

## 白色干渉の振幅情報と位相情報に基づく極めて薄い 透明電極ITO膜厚の計測

著者	陳 凱
発行年	2017
学位授与大学	筑波大学 (University of Tsukuba)
学位授与年度	2017
報告番号	12102甲第8401号
URL	<a href="http://doi.org/10.15068/00152347">http://doi.org/10.15068/00152347</a>

白色干渉の振幅情報と位相情報に基づく  
極めて薄い透明電極 ITO 膜厚の計測

陳 凱

2017年 10月

筑波大学大学院博士課程

数理物質科学研究科博士論文

博士（工学）

白色干渉の振幅情報と位相情報に基づく  
極めて薄い透明電極 ITO 膜厚の計測

陳 凱

（電子・物理工学専攻）

# 目次

論文要旨.....	1
第一章 序論 .....	2
1.1 研究の背景と意義 .....	2
1.2 透明電極 ITO 膜.....	3
1.2.1 ITO 膜の構造.....	4
1.2.2 ITO 膜の応用.....	6
1.2.3 ITO 膜の将来.....	7
1.3 透明電極 ITO 膜厚の光学的な計測方法 .....	8
1.3.1 分光干渉法.....	9
1.3.2 楕円偏光法（エリプソメトリー） .....	11
1.3.3 白色干渉法.....	13
1.4 本研究の目的.....	15
第二章 白色干渉計測の原理.....	18
2.1 白色干渉計測の概要.....	18
2.2 白色干渉に基づいた高さの計測原理 .....	22
2.2.1 インターフェログラムの位相情報により高さを求める方法 .....	25
2.2.2 インターフェログラムの強さにより高さを求める方法 .....	29
2.2.3 表面形状の計測の具体例.....	34
2.3 白色干渉計測の特徴.....	36
第三章 白色干渉計による実験システム .....	38
3.1 白色干渉計の構成 .....	38
3.2 照明光学系 .....	39
3.3 結像系.....	42
3.4 干渉光学系 .....	43
3.5 スキャン駆動システム .....	49
3.6 画像を取り込むシステム .....	51
3.7 白色干渉インターフェログラムの取得 .....	53
第四章 白色干渉に基づいた透明膜の厚さの解析アルゴリズム .....	55
4.1 白色干渉インターフェログラムと光源の関係 .....	55
4.1.1 光源スペクトルの幅.....	55
4.1.2 光源スペクトルの分布 .....	57
4.2 厚膜の計測 .....	59

4.2.1	透明膜によるインターフェログラムの変化.....	59
4.2.2	包絡線のピーク位置により表面形状と膜厚を求める方法.....	62
4.3	薄膜の計測 .....	63
4.3.1	膜厚さによる位相変化 .....	63
4.3.2	レーベンバーグ・マーカート法 (LM 法) による膜厚の解析.....	67
4.3.3	LM 法の限界 .....	74
第五章	白色干渉による極めて薄い透明膜の厚さを計測するアルゴリズム (CM 法) の開発.....	77
5.1	非線形位相 $\phi_D$ に基づいた膜厚の計測原理.....	78
5.2	線形フィッティングによる非線形位相 $\phi_D$ の抽出.....	79
5.3	カーブマッチング法 (CM 法) による位相の照合.....	85
5.3.1	CM 法による曲線類似性の判定原理.....	85
5.3.2	CM 法のシミュレーション結果 .....	89
5.4	CM 法と LM 法の比較 .....	94
第六章	極めて薄い透明膜の厚さを計測する CM 法の改良.....	95
6.1	CM 法の安定性とノイズの関係.....	95
6.1.1	ノイズの影響 .....	95
6.1.2	異なるノイズによる、計測結果の変化.....	97
6.1.3	不安定データの生成原因.....	98
6.2	振幅情報による不安定データの除去 .....	100
6.3	改良した CM 法のシミュレーション検証結果 .....	103
第七章	実験の計測結果.....	107
7.1	90nm の透明電極 ITO 膜の計測結果 .....	107
7.1.1	実験用のサンプルの仕様.....	107
7.1.2	90nm の透明電極 ITO 膜厚の三次元計測結果.....	109
7.1.3	光源スペクトル分布の影響 .....	117
7.2	9nm の透明電極 ITO 膜の計測結果 .....	118
7.2.1	実験用のサンプルの仕様.....	118
7.2.2	9nm の透明電極 ITO 膜厚の三次元計測結果.....	120
7.3	計測精度の向上 .....	124
7.3.1	異なる屈折率分散による計測結果の変化 .....	125
7.3.2	屈折率分散の最適化 .....	129
7.3.3	開口数 NA の影響及び対策 .....	135
7.4	再現性の検証.....	138
7.5	計測結果のまとめ .....	139
第八章	白色干渉計測の結論と展望 .....	141
参考文献	.....	142
謝辞	.....	146

# 論文要旨

透明電極 ITO 膜の開発は世界的には 70 年代から始まった。ITO 膜は主として、液晶ディスプレイ (Liquid Crystal Display、LCD) 製造のために使われている。ITO 膜の発展とともに、液晶ディスプレイも急速に発展した。CdTe 太陽電池などの透明性および高い導電率を有する薄膜太陽電池も、透明酸化物半導体を電極材料とする。また、液晶ディスプレイ、ダイオード、有機 EL ディスプレイにも適用可能である。透明膜の膜厚及び均一性は製品の性能に決定的な影響を持っているために、透明電極 ITO 膜のような透明膜の膜厚を計測することは非常に重要である。

レーザー光とは違い、白色光はコヒーレンス長が短いため、干渉縞は狭い範囲にしか現れない。白色光源では、光路差ゼロの位置でコントラストが最も高くなるように干渉縞が発生するため、白色干渉に基づいて透明膜の膜厚を計測する方法は、位相  $\pi$  の不確定性による計測誤差を回避することができ、レーザーの限られた計測範囲を拡張するのに効果がある。

本研究では、白色干渉による膜厚の計測原理に基づいて、白色インターフェログラムをフーリエ変換すると、振幅情報と位相情報が得られた。線形フィッティングにより、膜内部の反射による非線形位相を抽出することができる。Matlab ソフトウェアを利用して、一連の理論的な位相情報のモデルをたてた。抽出した非線形位相はたてた位相情報のモデルと一つずつ照合して、非常に薄い透明電極 ITO 膜厚 (90nm) を解析できるカーブマッチング法 (Curve Matching) を開発することを行った。しかし、ノイズがあるため、極めて薄い透明電極 ITO 膜厚 (9nm) が計測できない。

次に、振幅情報により不安定な位相データを除去していた。残った有効な位相データの位相情報を利用し、この改良した CM 法により、極めて薄い透明電極 ITO 膜厚 (9nm) が計測できるようにした。

従来の方法は、非線形最適化手法で最適な光路差  $h$  と膜厚  $D$  を探してから、対応の膜厚を求める。50nm 以下の透明電極 ITO 膜厚が計測できない。そして、計測量の上で、本研究の開発方法よりはるかに高いことがわかった。

最後に、ノイズ、サンプルの屈折率分散、対物レンズの開口数 NA などの計測精度に影響を与えるパラメータを考慮して、計測結果の正確性と精確性が向上するようにした。

本研究は、白色干渉計測による透明膜の膜厚の計測範囲を従来の 50nm 以上から数 nm 以上にまで拡大するため、新しいアルゴリズムを開発することを目的としている。開発したカーブマッチング法で、90nm の透明電極 ITO 膜を計測できた。その後、カーブマッチング法を改良し、9nm の透明電極 ITO 膜を計測できるようにした。また、白色光干渉計を用いることで ITO 膜の膜厚と表面形状を同時に計測する三次元計測方法を開発する。

# 第一章

## 序論

### 1.1 研究の背景と意義

電子製品は多くの領域で役に立ち、徐々に人々の生活のあらゆる側面に影響を与えるようになった。これらの中で、高い導電性と高い可視光透過特性を持つ、光電材料の研究は透明導電膜技術研究と呼ばれている。この研究内容はエネルギー、情報、防衛などの重要な領域における広い応用範囲と高い研究の意義を持っている。

透明導電膜はタッチパネル、フラットパネルディスプレイ、電子ペーパー、太陽光発電装置、電磁遮蔽、自動車の曇止め、帯電防止コーティング、透過率可変ガラス及びガスセンサーなどの高い導電率、高い透過率の必要とされる領域で広く応用されている。2009年から需要量が徐々に拡大するにつれ、持続的な技術の進歩が見られた。透明導電膜は最初に液晶パネルとタッチパネルに应用されている。2015年以降、技術革新に従って、透明電極膜はタッチパネル、電子ペーパー、太陽電池、有機EL、液晶ディスプレイや薄型テレビなどの方面に更に広く応用されることが予想される<sup>1,2)</sup>。

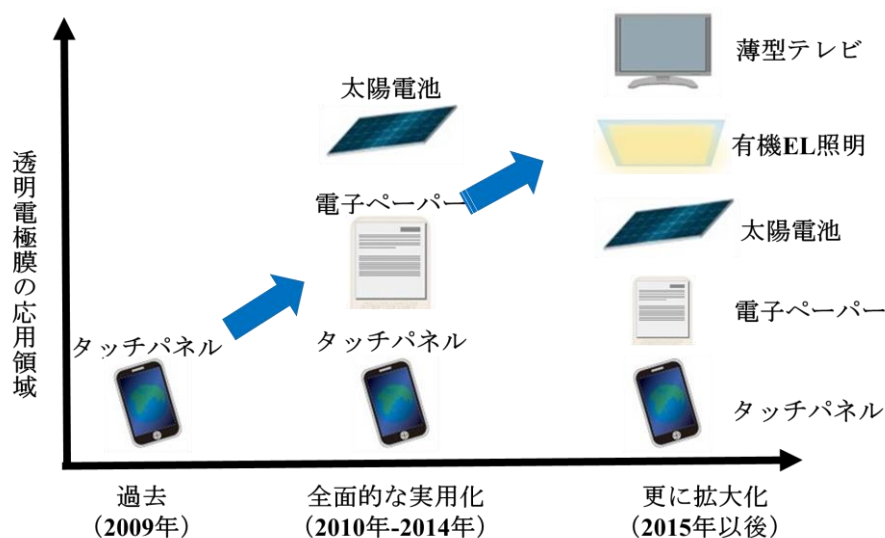


図.1.1 普及は段階的に進む<sup>1)</sup>

Nanomarket 会社の 2010 年に公表した予測によると、アップルのタッチパネル製品の巨大な成功および、フラットパネルディスプレイ、タッチパネル、薄膜太陽電池と有機発光照明などへの応用によって 2017 年には、透明導電膜の需要が 5 億立方メートルに達する。透明導電膜の市場は 2010 年に 24 億ドルに達しているが、2017 年には 76 億ドルに達して、年間成長率は 17.9%である。そのため、透明導電膜技術の研究は重要な意義を有している。

## 1.2 透明電極 ITO 膜

透明導電膜は、可視範囲内（波長は 380nm～760nm）の良好な光透過率（90%以上）と高い導電性（抵抗率は一般に  $10^{-3}\Omega\cdot\text{cm}$  より低い）を有する膜材料として定義することができる。現在の市場で大きな売り上げを持つ透明導電膜は ITO（ $\text{In}_2\text{O}_3:\text{Sn O}_2=9:1$ ）膜と FTO（ $\text{SnO}_2:\text{F}$ ）膜だけである。表 1.1 において、ITO は透明導電膜として最優秀な総合性能（低抵抗と高透過率）があり、市場占有率がおよそ 94%を占めているため、最も一般的に使用される透明導電膜の材料といえる<sup>3,4,5</sup>。

表 1.1 透明導電材料の比較

透明導電材料		特性※	
		表面シート抵抗 ( $\Omega/\text{sq}$ )	可視光透過率 (%)
金属膜	Au	$1\cdot 10^2$	60-80
	Pd	$10^3\text{-}10^8$	60-80
	Pt	$10^3\text{-}10^8$	60-80
	Ni-Cr	$10^3\text{-}10^8$	60-80
	Al	$1\cdot 10^4$	15-50
	Al 網	$10\text{-}10^2$	60-70
半導体薄膜	$\text{In}_2\text{O}_3\text{-SnO}_2$	$1\cdot 10^3$	75-90
	CuI	$10^4\text{-}10^8$	70-80
	CuS	$10^4\text{-}10^8$	70-80
コンポジット薄膜	$\text{Bi}_2\text{O}_3/\text{Au}/\text{Bi}_2\text{O}_3$	1-10	70-80
	$\text{TiO}_2/\text{Ag}/\text{TiO}_2$	1-10	70-85

※膜厚 3～15nm

酸化インジウムスズ（Indium Tin Oxide）というのは酸化インジウム（III）（ $\text{In}_2\text{O}_3$ ）と酸化スズ（IV）（ $\text{SnO}_2$ ）の無機化合物であり、一般的に ITO と呼ばれている。ITO 粉末は黄色、灰色であるが、可視光領域の透過率が高いため、薄膜ではほぼ無色透明である。実用上、 $\text{In}_2\text{O}_3$  と  $\text{SnO}_2$  の重量比 9:1 程度で用いられることが多い。

19 世紀末においては、透明導電膜の研究は実際のところ、光導電性材料上に金属薄膜を得ることで



あった。透明導電材料の研究は、第二次世界大戦中に新しい時代に入り、主に航空機の除氷ガラス窓に使用された。1950年に、第二種類の透明半導体酸化物の  $\text{In}_2\text{O}_3$  が最初に作られた。特に  $\text{In}_2\text{O}_3$  中にスズを取り込んだ材料が、透明導電薄膜において広く使用された。

透明電極 ITO 膜の特徴は導電性と透明性である。膜厚が増すと、電荷密度が向上し、導電性も向上するが、その一方で透明性が低下する特性を持っている。透明電極 ITO 膜は主に電子ビーム蒸着法、物理気相成長法、スパッタ蒸着法などを用いて製造されている。

そして、透明電極 ITO 膜は良好な光電特性を持っているため、光電子デバイスにおいて、広く使用されている。透明電極 ITO 膜は単独で、または他の材料と組み合わせて使用して（ガラス基板の厚さは通常 0.3～1.1mm）、反射防止膜を構成できる。反射防止膜の厚さは材料の屈折率と関係があり、透明電極 ITO 膜の屈折率は、多くの要因によって影響されている。透明電極 ITO 膜は複雑な光学的性質を持っているため、光学定数を計測することは非常に困難である。

### 1.2.1 ITO 膜の構造

透明導電膜、透明電極 ITO 膜とタッチパネル用 ITO 膜の関係は図.1.2 のようである。

ITO 膜は透明導電膜として広く応用されている。特に透明 ITO 膜として、需要量は急速に増加している。

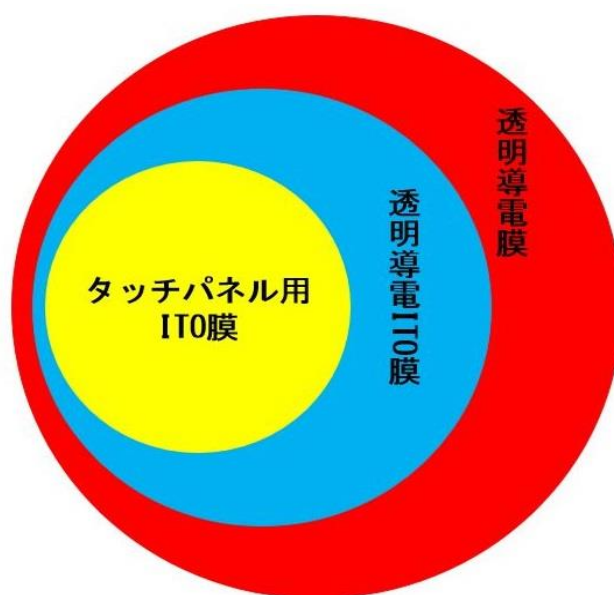


図.1.2 透明導電膜、透明電極 ITO 膜とタッチパネル用 ITO 膜の関係

液晶ディスプレイを例にとり、平面型の表示装置である液晶パネルを見ると、その後ろに密着して位置するバックライトユニット、インタフェース回路、バックライトユニットの冷陰極管を照明させるための高電圧を生み出す昇圧回路などで構成される。

液晶パネルの断面構造をみると、図.1.3 のような二枚の薄いガラス板の間に液晶を挟んだ構造をしている。ガラス板の表面には、液晶分子を特殊な形にねじれさせるための配向膜、液晶層に電圧をかけて液晶分子の向きを制御するための透明電極、カラー表示を可能にするカラーフィルタなどが形成さ

[illegible]

液晶ディスプレイは電気を流した時に、図.1.5 に示すように液晶層に電流を流すと、その向きに合  
て液晶分子が並べる。この状態では光の振動成分しか進むことができないので、液晶層からは水平  
動の光が出てくるが、この光は前側の偏光板にさえぎられてしまう<sup>9)</sup>。

5

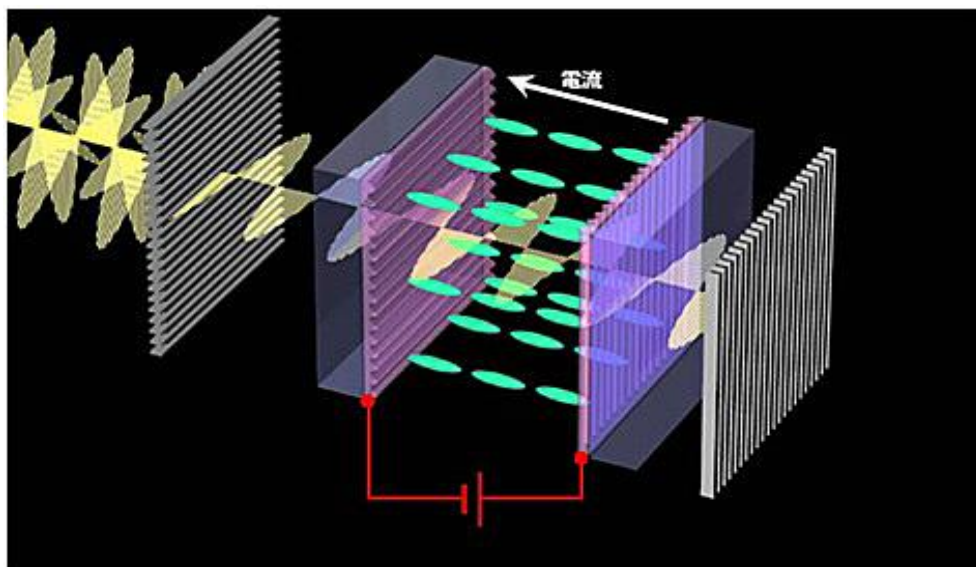


図.1.5 電気を流した状態（光を通さない）<sup>6)</sup>

液晶を表示するためには、液晶に挟まれた透明電極が必要である。この電極に電圧をかけると液晶の分子構造の変化によって光が遮断され、逆に電圧をかけないと光が通る。この電圧をかけるために、非常に小さな電極が敷きつめてある「透明電極 ITO 膜」が必要である。

液晶ディスプレイでは、「透明電極 ITO 膜」を制御する液晶の分子構造を各電極の信号で変化させて画像を表示する。「透明電極 ITO 膜」は、透明性が高く、表示を乱さないような製品が要求される非常に薄い膜であり、表示用液晶の鮮鋭度や美観にも影響する。

## 1.2.2 ITO 膜の応用

ITO 膜は高い導電性、可視光の高い透過率、高い機械的な硬度と化学安定性を有する n 型半導体材料である。したがって、ITO 膜は主に透明電極として用いられている。液晶ディスプレイ、薄型テレビ、プラズマディスプレイ、タッチパネル、電子インク、有機 EL、太陽電池、帯電防止剤、電磁波シールド材料などで幅広く応用されている。有機 EL では、ITO はアノード（正孔注入層）として用いられる。

また光学コーティング剤としても用いられることがある。特筆すべきは赤外線反射材としての利用であり、建築物や自動車、ナトリウムランプのガラスなどに応用されることがある。このほかにもガスセンサーや反射防止膜、表面処理剤や半導体レーザーへ応用されている。

透明電極 ITO 膜は良好な光電特性と導電性を持っているため、近年、急速に発展して、特に液晶ディスプレイ、太陽電池の透明電極、薄膜トランジスタ（TFT：Thin Film Transistor）の製造、赤外線反射材料、列車飛行機ガラス及びビルカーテンウォールガラスの解凍などの方面に広く応用されている。大きな市場規模は形成された。ITO 膜の産業化の応用は主に以下の方面がある。

### 1、液晶ディスプレイ

ITO 膜は電氣的に伝導でき、可視光領域において透明である。そして、良好なエッチングを持っているために、ITO 膜は液晶ディスプレイ、LED 照明、ELD（electric load dispatcher）などに広く使用されて

いる。現在、様々なディスプレイデバイスの中で、液晶ディスプレイの産量が高い。ディスプレイデバイス装置の面積化、Retina 化の発展にしたがって、ITO 膜は液晶ディスプレイの領域に更に広く応用されることを予見できる。

## 2、太陽電池の電極

ITO 膜は太陽電池の酸化物層に使用することができ、電池のエネルギー変換効率を向上させることが可能になる。そして、太陽電池の透明電極として使用することができる。

## 3、熱放射反射鏡

ITO 膜は光波の選択性により、広く熱放射反射鏡に使用されている。寒い場合には、ガラスあるいは太陽能アキュムレーターは熱エネルギーを密封の空間に保存して、サーマルシールドの効果がある。ITO 透明ガラスが寒い地区に大型建物のカーテンガラスに使用されることは熱放射反射鏡に応用される典型的な実例である。このようなカーテンガラスを使用すると、高層ビルのエネルギー消費量を大幅に節約することができる。

## 4、透明表面のヒーター

ITO 膜は導電性であり、透明である特性を利用して、透明表面のヒーターに応用されている。このような透明表面のヒーターは自動車、電車、飛行機などの交通工具のガラス、水上スキーメガネなどのアンチフリーズを使用し、そして、料理用の加熱板のヒーターも使用することができる。

### 1.2.3 ITO 膜の将来

去年に Apple iWatch の発表するに従って、ITO 材料を取って代わる話題に関して再度にホットトピックになった。透明導電膜の技術は、主に以下の点で問題が存在している。

1. 主原料金属インジウム (In) が希少金属であり、その生産量は非常に少ない。ITO 膜は需要量が増加し続けるに従って、やがて ITO 膜の供給は不足が現れる。
2. 光電子デバイスの急速な進歩は、透明電極の需要がますます厳しくなっている。
3. 有機半導体材料は、低コスト、軽量、簡単な製造技術、化学的切断、柔軟な準備などの無機半導体材料の性能上の利点を交換することができない優勢があり、近年では急速に発展している。
4. 高品質の可撓性透明導電膜を製造することは困難である。現在には透明電極 ITO 膜は可撓性の部品による、透明電極の要求を満足させることができない。

透明電極は良好な産業の見通しがあり、今の ITO 膜に比べて透過率などの特性で優れる、折り曲げに対応しやすい、更に低コストで製造できる。これらの特徴が生きる用途は、タッチパネルや電子ペーパーだけ応用されない。太陽電池や液晶パネルなど大きな効果を発揮する新たな透明電極材料を開発している。研究方向は主に、他の種類の酸化物 (TCO)、金属ナノワイヤ (銀ナノワイヤなど)、ポリマー、カーボンナノチューブなどの透明導電膜を含んでいる。

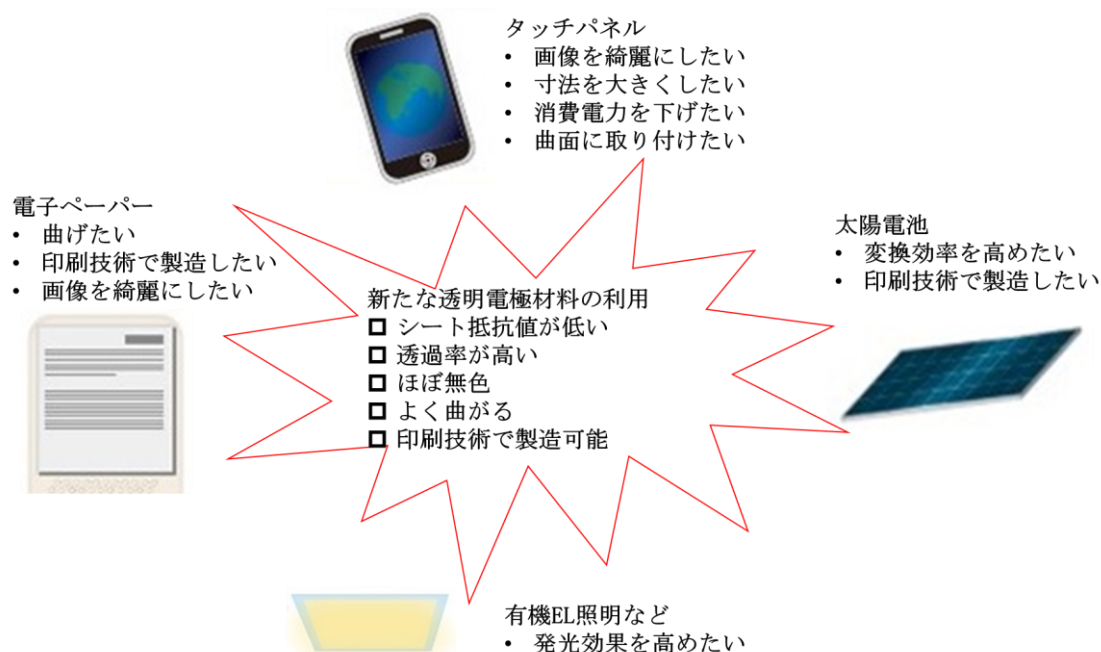


図1.6 新たな透明電極材料を機器の付加価値向上や低コスト化の切り札に<sup>1)</sup>

新たな透明電極材料は、既に一部のタッチパネルに採用実績がある。次に、印刷技術の確立などに伴い、電子ペーパーにも採用が広がりそうだ。その後、太陽電池や液晶テレビ、有機 EL 照明などの透明電極材料として利用される可能性がある。

大型のガラス基板への対応が不可欠だからである。液晶パネル業界では、2009 年中に第 10 世代のガラス基板を用いた大型パネルの生産が始まる。これに使う ITO 膜のターゲット材料も第 10 世代に対応済みな上、液晶パネルの歩留まり向上に向けた最適化も進んでいる。こうした状況の下では、実績に乏しい新材料が短期間に既存の ITO 膜を置き換えるのは難しい。新材料にとっては、印刷技術などによる劇的な低コスト化を実証した上で、大型パネルに向けた大規模な生産体制を構築することができる可能性がある。これができれば、ITO 膜の置き換えが視野に入るとみられる<sup>4,5,7)</sup>。

## 1.3 透明電極 ITO 膜厚の光学的な計測方法

ITO膜の電気的な特性に影響を与える要因はITO膜の表面シート抵抗 $R$ 、膜厚 $D$ と抵抗率 $\rho$ が相互に関連している。この三つの間に公式は

$$R = \frac{\rho}{D} \quad (1.1)$$

である。

式1.1から分かるように、ITO膜の異なる表面シート抵抗 $R$ を得るために、実際には、異なる膜厚及び抵抗率を得ることである。

一般的に、ITO膜を調整する時に異なる膜厚を取得することは比較的容易であり、成膜速度と蒸着時間を調整することにより、必要な膜厚を取ることができる。そして、適切な方法および手段を通じて精密な膜厚及び均一性を制御することができるようにする。



ITO膜の表面シート抵抗 $R$ は、主要なITO膜の製造プロセスであり、表面シート抵抗 $R$ もITO膜の性能を計測するための重要な指標である。ITO膜の製造プロセスにおいて、ITO膜の表面シート抵抗 $R$ はITO膜材料の構成（スズ含有量及び酸素含有量）と関係があるだけでなく、同時にITO薄膜を製造するプロセス条件（基板温度とスパッタ堆積電圧など）と関係がある<sup>8)</sup>。

現在には種々の薄膜が多くの工業分野で利用されているが、このITO膜の膜厚を計測と制御することは非常に重要である。

一般的な膜厚を計測する方法は、触針式、断面観察、光学式（非接触）と大きく三つに大別される。それぞれ、特徴があり、また利用できる膜や基板への制約もある。直接的で、最も原始的な手法である接触式は膜に針をなぞらせ段差を計測する方法であり、断面観察は断面から光学顕微鏡やSEMなどで観察する方法である。触針法や、電子顕微鏡（SEM、TEM など）による断面を観察する方法は、誤差が少ない。しかし、計測の時に、終始サンプルに接触するので、致命的なダメージを与えてしまう危険性がある。そのため、品質管理用には向かない。ただ、これらの計測方法はサンプルに計測器を接触させることやサンプルを破壊しなければならないといったデメリットがあり実際の製品を計測しにくいという課題がある。

本文では、非接触で計測できる光学的膜厚計測法について述べる。光学式計測法は、光による膜からの反射を計測することにより薄膜の特性を計測する方法です。この方法は、膜厚のみならず膜の光学定数の解析も行うことができる。非接触の光学式計測法には一般的に分光干渉法、楕円偏光法と光干渉法などの種類がある。エリプソメトリーは、サンプルに対して光を斜めに入射させ2つの偏光を計測することで、反射率分光法よりも優れた計測が可能である。分光干渉法は、サンプルに対して光を垂直に入射させ反射した光を分光計測する方法である。エリプソメトリーと比較して、簡素と安価で計測が可能であるが、複雑な膜構造を持つサンプルには限界が生じてしまう。

### 1.3.1 分光干渉法

薄膜サンプルに白色光が入射すると、膜内部の多重反射が起こる。この多重反射光は、互いの位相差に応じて強め合ったり弱め合ったりしている。各多重反射光の位相差は、光の波長と光路長（=薄膜内で光が往復する距離×膜の屈折率）によって決まる。このため、サンプルからの反射または透過スペクトルは、膜厚に依存した特有のスペクトルになる。分光干渉法はこのスペクトルを解析することにより、膜厚を計測する方法である。

図.1.7 に示すように干渉信号を分光すると波長ごとに強度変化が現れる。膜厚があると、山谷の数が増加することがわかる。また、横軸を波長とした場合は短い波長側の間隔は長波長側の間隔よりも短くなる。薄膜の表と裏面の両方で光が反射した光の量は、これら二つの反射の合計となる。この二つの界面からの反射は、お互いの位相関係で明るくなったり暗くなったりする。お互いの位相関係は二つの反射の光路は、即ち、膜厚、光学定数、光の波長で決まる。光路が波長の整数倍の時に、反射の位相が合い光は強まる<sup>9)</sup>。

透明膜に対して、反射率は式 1.2 で表すことができる。このことから、下に示す様に膜の反射率は、 $1/\lambda$  毎に周期的に変化することが分かる。

$$R \approx A + B \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda}\right) nd \quad (1.2)$$

つまり、膜厚が厚いほど反射率の周期の数が多くなり、薄いほど周期の数が少なくなり、極端に薄い膜となると周期の一部しか表示されない場合がある。

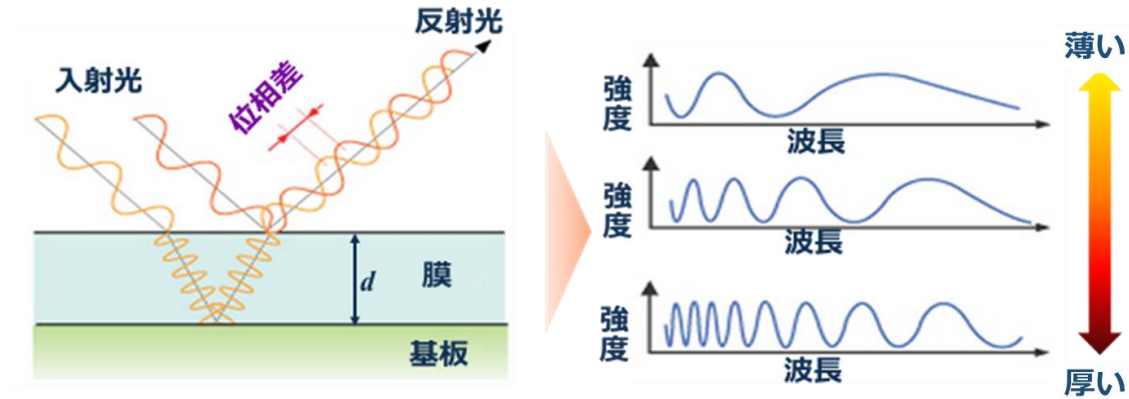


図.1.7 分光干渉法の原理図<sup>9)</sup>

式 1.3 により、透明膜の膜厚を導き出すことが可能である。

$$d = \frac{\Delta m}{2\sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}} \times \frac{1}{\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1}} \quad (1.3)$$

ここで、 $d$ は膜の厚さ、 $\Delta m$ は計算波長範囲の間の山の数、 $n$ は屈折率、 $\theta$ はサンプルへの入射角、 $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ は計算波長範囲の始点と終点の波長である。

式 1.3 により、分光干渉法は反射率により、膜厚を求める方法である<sup>10)</sup>。

一般的な分光干渉法に基づき、代表的な計測方法の分光光度計を説明する。

分光光度計は特定の波長または特定の波長範囲内に光吸収は被測材料に、定性的または定量的に分析する方法である。薄膜の透過率曲線または反射率曲線により、薄膜膜厚を計算する方法である。

従来の波長範囲は (1) 200～380nm 紫外光領域、(2) 380～780nm の可視光領域、(3) 2.5～25μm の赤外光領域である。使用される機器は UV 分光光度計、可視分光光度計 (比色計)、赤外分光光度計と原子吸光分光光度計である。

分光光度計は複数の波長を生成することができる光源を使用して、シリーズの分光装置を通して、特定の波長の光源を生じた。サンプルを透過してから、光の一部は吸収されて、サンプルの吸光度を計算して、したがって試料の濃度に変換する。サンプルの吸光度と濃度に比例している。

単色光は試験物質の溶液を入射する時に、この物質に吸収される量は、物質の濃度および液体層の厚さ (光路長) に比例して、以下の式のように

$$A = -\lg \frac{I}{I_0} = -\lg T = kLc \quad (1.4)$$

である。

この中に、 $A$  は吸光度であり、 $I_0$  は入射光の強度であり、 $I$  は透過光の強度であり、 $T$  は物質の透過率であり、 $k$  はモル吸収係数であり、 $L$  は光路長 (液体層の厚さ) であり、 $c$  は物質の濃度である。

次に、光電式分光光度計は分光光度法の原理に基づいて、常用に膜厚計測装置である。これを利用して、薄膜の透過率曲線を得ることができる<sup>11,12)</sup>。

図.1.8 に、分光光度計の原理的な装置の構造を示す。

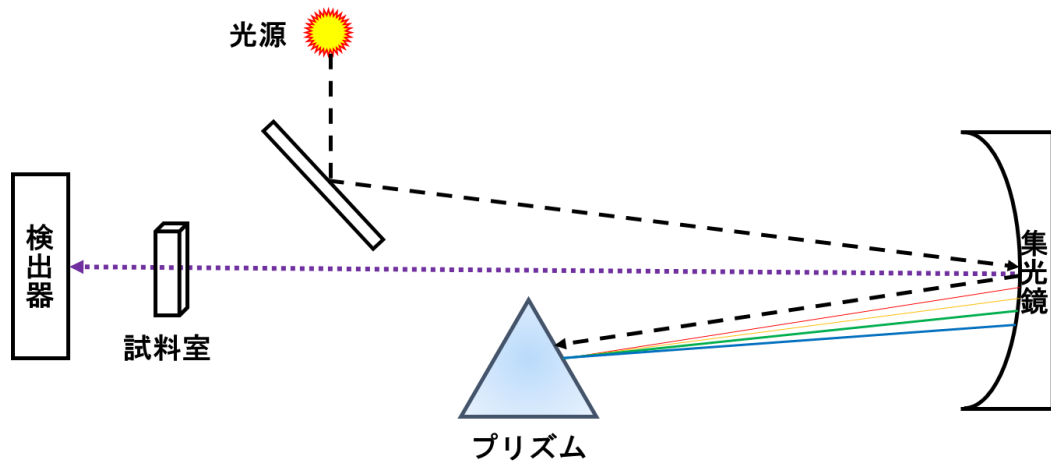


図.1.8 光電式分光光度計の原理図

光源から光は対照試料と計測試料を通じて、光を電気量に変換する検出器には光電子増倍管やフォトダイオードが使われ、この出力信号を信号処理装置に送る。計測試料の透過率、反射率と吸収率などの光学特性パラメータを得ることができる。一般的な分光光度計は薄膜の反射率と透過率のスペクトル曲線を計測することが必要であるが、反射率を計測する場合に、部分品を増えて要る。そのために、分光光度計は透過率を計測することを通じて、薄膜の膜厚を計算する。

### 1.3.2 楕円偏光法（エリプソメトリー）

エリプソメトリーは、サンプルの表面で光が反射するときの偏光状態の変化から、サンプルの光学定数（膜厚、屈折率など）を解析する方法である。

入射光の偏光状態は既知で、反射してから、この入射光の偏光状態は直線偏光から楕円偏光になる。電場が入射面に対し平行に振動する直線偏光をp偏光、電場が入射面に対し垂直に振動する直線偏光をs偏光と呼ぶ。p、s偏光を試料に入射させたとき、p、s偏光の振幅反射係数はそれぞれ異なる。そのため、試料での光反射によりp、s偏光のそれぞれの振幅及び位相は大きく変化する。



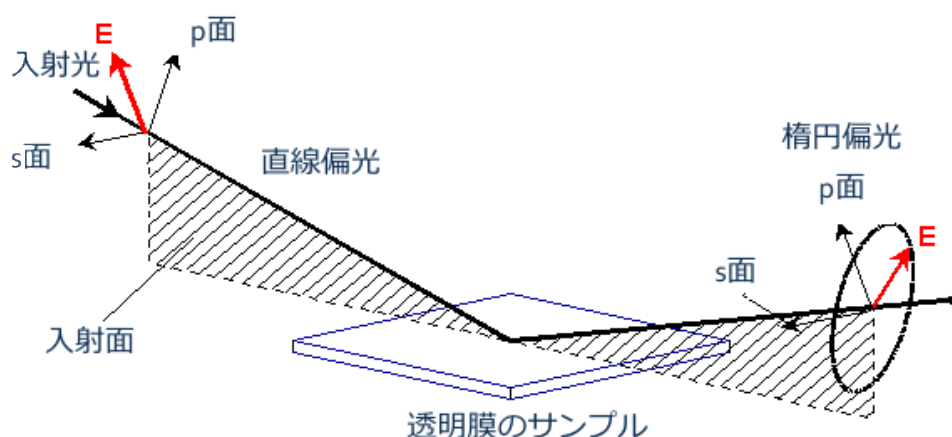


図.1.9 エリプソメトリーの原理図

エリプソメトリーでは、反射p、s偏光の振幅比及び位相差を角度で表した $\Psi$ と $\Delta$ の二つの値を決定する。偏光解析ではp、s偏光の振幅反射率比を $\tan \Psi$ 、位相差を $\Delta$ とにおいて、 $\Psi$ と $\Delta$ の組を計測する。エリプソメトリーで決定される反射率比 $\tan \Psi = \frac{r_p}{r_s}$ と位相差 $\Delta = \delta_p - \delta_s$ はp、s偏光の振幅反射係数の比として次式で表される<sup>13,14</sup>。

$$\rho = R_p/R_s = \tan \Psi e^{i\Delta} \quad (1.5)$$

pとs偏光に対する複素反射率比を $\rho$ とすれば、反射光は楕円偏光となる。この反射率比と位相差は、屈折率と膜厚の関数で与えられるので、計測値反射率比と位相差から、屈折率と膜厚を求めることができる<sup>15,16</sup>。

一般的に、エリプソメトリーの計測方法としては主に二つの方法に分けられ、それぞれ下記のような長所と短所を持っている。

表1.2 エリプソメトリー計測方法の比較

	原理	長所	短所
回転検光子法	検光子を回転させて反射光の偏光状態を観測し、 $\Psi$ と $\Delta$ を検出する	装置の構成が簡単なので、 $\Delta=90^\circ$ 付近で精度が良い	計測時間が長い $\Delta=0, 180^\circ$ 付近で精度が悪いため、 $k>0.1$ しか測れない
位相変調法 JY採用	光弾性変調器 (PEM) の働きにより、高速で $\Psi$ と $\Delta$ を検出する	精度が良い 計測時間が短い 機械的な振動がない	温度変化に弱い PEMに波長依存性があるので、キャリブレーションが必要である

回転検光子法を例として原理を説明して、光はその進行方向に対して垂直な面内で電界と磁界が振動している横波である。図.1.10に示すように、普通の光にはいろいろな方向に振動している電界が含ま

まれているが、偏光板や1/4波長板を通すと電界の方向が時間とともに回転する光（楕円偏波と言う）を作ることができる。この楕円偏波の光が、表面に薄膜の存在する基板に入射すると、膜中で光は多重反射を起こし、反射光の楕円偏波の状態が変化する。そこで図.1.10に示すような、2枚の偏光板と1枚の1/4波長板を用いたエリプソメトリーを用いることにより、楕円偏波の状態がどのように変化したかがわかる。楕円偏波の状態は、振幅比 $\Psi$ と位相差 $\Delta$ と呼ばれる量で規定できるので、エリプソメトリーでこの振幅比と位相差を求め、コンピュータにより膜厚と屈折率を求める。

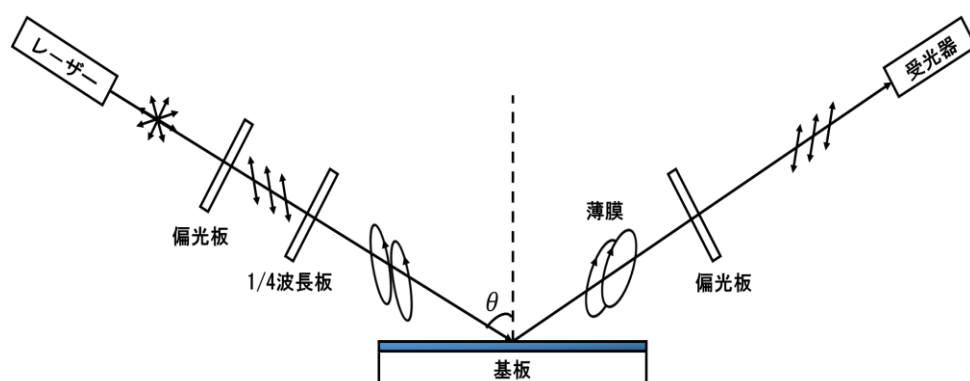


図.1.10 回転検光子法の原理図

### 1.3.3 白色干渉法

#### 1、透過干渉法

光の干渉とは、対象物表面からある点までの光の距離（光路）に差が生じると発生する現象であり、この現象を利用して、膜厚を計測している。

基板のない独立透明膜の場合には、その膜を干渉光路の片側に挿入して、膜による光路差変化を計測することにより、膜厚が求められる。例えば、図.1.11に示すように表面形状計測装置の計測視野の1部に透明膜を挿入して計測基準面を計測し、膜の有無による段差から膜厚 $D$ を求める。透明膜は計測基準面から離して、可干渉範囲外におく。この方法は膜厚が薄い場合や多層膜でも適用可能である。また、膜の位置やうねりの影響をうけず、安定した計測ができる<sup>16)</sup>。

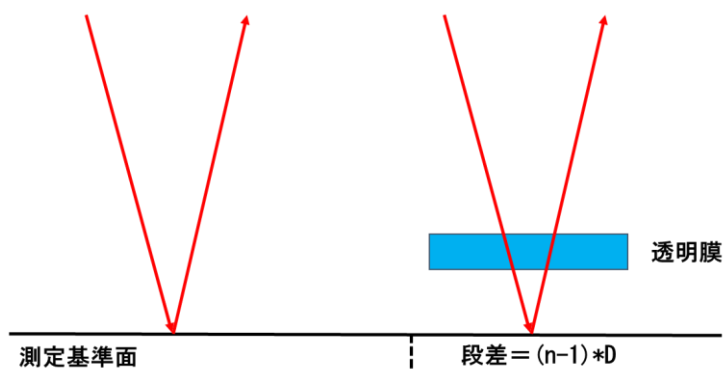


図.1.11 透過干渉法による膜厚計測の原理

## 2、白色干渉法

白色干渉法は、光干渉において白色光がレーザー光と違いコヒーレンス長が短いために干渉縞が狭い範囲にしか現れない。更に、参照ミラーを走査すると、生じた干渉縞の解析により、透明膜の表面形状と膜厚を同時に求める方法である<sup>17)</sup>。

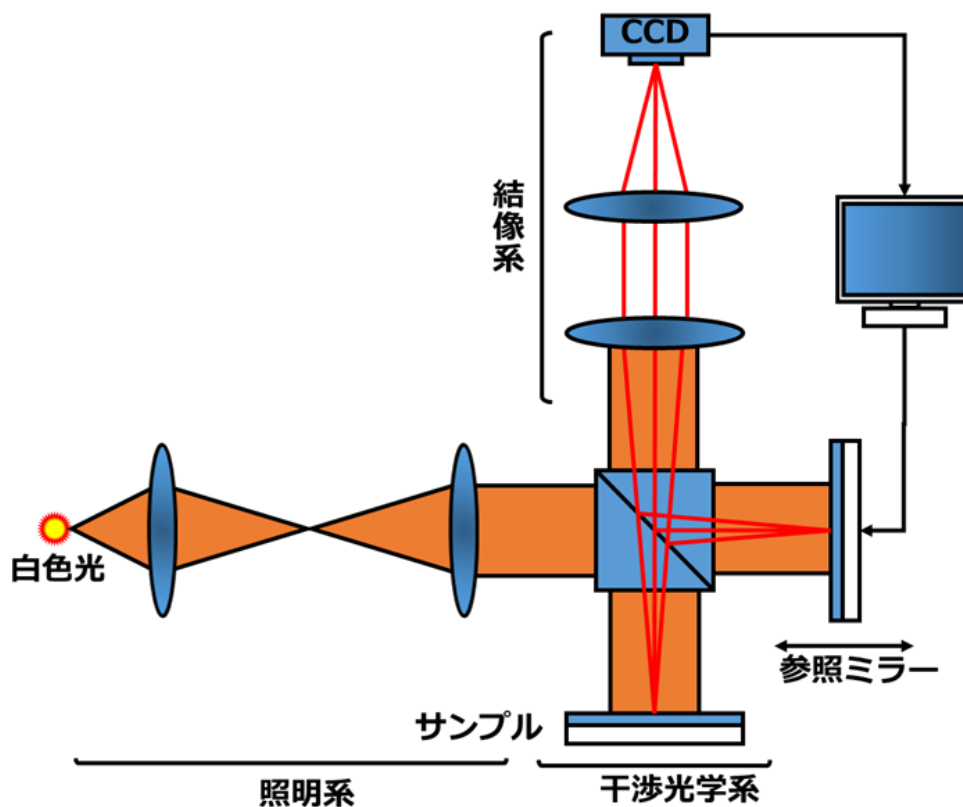


図1.12 白色干渉法による膜厚計測の原理

近年、デジタル画像処理技術を利用して、表面形状を自動計測する代表的手法は位相シフト法（PSI 法）と垂直走査法（VSI法）がある。位相シフト法は、干渉計の参照光と信号光の間に任意の位相差を与えた時、干渉強度の変化を計測することにより、参照光と信号光の位相差を計算する方法である。

位相シフト法のような制約がなく、計測面に段差があっても計測可能な手法として、垂直走査法（低コヒーレンス干渉法、白色干渉法とも呼ばれる）がある。

従来の垂直走査法ではインターフェログラムの包絡線ピーク位置から高さを求めていて、PSI 法に比べ精度が劣っていたが、位相情報を利用して精度を上げる。この方法は白色PSI 法とも呼ばれて、従来のPSI 法の特長を生かしつつ、計測レンジを広げ、アンラッピングを不要化しているアルゴリズムはWSI 法と呼ばれる<sup>18)</sup>。表1.3は光干渉法により三次元計測の比較が挙げられる。

以上により、本研究では白色位相シフト法に基づいて、透明電極ITO膜厚を計測することを行う。

表1.3 光干渉法により三次元計測の比較<sup>18)</sup>

項目	位相シフト法：PSI	垂直走査法：VSI	白色位相シフト法：WSI
照明光	単色	白色	白色
原理	位相検出	ピーク検出	ピークと位相検出
対象面	平滑面限定	汎用	汎用
精度	◎ ～0.01nm	△ ～数nm	○ ～1nm
走査速度	20μm/s	任意	214μm/s
特徴	高さ分解能がある 反射率変化に無関係に計測できる 4-5枚の画像を取り込むだけで、画面内の全点の高さ計測が1秒以内に可能である 隣接画素間の段差 $\pm\lambda/4$ 以内	表面凹凸に制限がない 計測レンジも任意に拡大可能 低域フィルタ法 重心法 周波数領域法（FDA） 一般標本化定理による方法（SEST 法）	本研究は周波数領域法（FDA）により、改良した白色干渉法を開発することである

光干渉法により三次元計測を比較してから、白色干渉法により、膜厚を計測するために、白色干渉計（Michelson干渉計により）を使用して、インタープログラムを得ることができた。光源から出射した光は、コリメータレンズを通過して平面波となり、ビームスプリッタにより直交する二方向に振幅分割される。参照面と被検面で反射された光波は再びビームスプリッタにより結合されて干渉する。干渉縞はCCDカメラで、コンピュータに取り込んで、解析するにより、膜厚を計算することができる。

## 1.4 本研究の目的

分光干渉計は、計測のために、いくつかの制限がある。試験プロセスで、反復計算を通過する必要があるので、膜厚が厚い場合にのみ、計測結果がより正確になる。

エリプソメトリーは、高感度の利点があるが、計測結果は外部（屈折率の不均一性）からの影響を受けやすく、同時に、厚さを求めるために複雑な数学的モデルが必要である。分光法では  $nd$  が求められるが、 $nd$  の分離が困難になることである。この欠点は分光法に共通の問題点でもある。

ZYGO は白色干渉の原理により薄膜の膜厚を計測する方法を発表して、フーリエ変換を利用して、インタープログラムから、二つのピークを取り出すことができる。このアルゴリズムは薄膜の膜厚に影響を与えない。

白色干渉計測により、これまでは数 nm 程度の非常に薄い膜厚を求めることが困難である。

上述の透明膜の膜厚の計測方法は全部、非破壊、非接触の計測方法である。計測範囲、計測精度、計測方式などの方面で、表 1.4 に示すように、触針法と比較して、長所と短所が挙げられる。

計測精度は対物レンズの開口数 NA と関係がある。

表 1.4 膜厚計測の比較

	触針法	分光干渉法	エリプソメトリー	白色干渉法
非破壊非接触	×	○	○	○
計測方法		反射率曲線	偏光状態	位相情報
計測範囲	5nm～250μm	300nm～60μm	3nm～15μm	50nm～1000μm
計測精度	0.5nm △	0.1nm ○	0.3nm ○	0.01nm～数 nm ◎
計測方式	点計測	点計測	点計測	面計測
計測速度	○	△	△	◎
価額	○	○	△	◎
長所	あらゆる種類の膜の厚みが求められる	試料に対して他の物質や加熱と冷却などをしなくても、濃度が計測や物質の同定ができる 吸光分析の前後で試料が変化しない 正確に濃度が計算できる	屈折率が未知でも膜厚が求められる 計測量の増加 波長変化による、相関関係の減少 計測と解析精度の向上 界面やラフネスなど、複雑なサンプル構造の解析可能	広視野（数角）を、サブナノメートルの高さ分解能（0.1nm）で計測可能 計測時間が早い
短所	断面だしのために、サンプルを破壊する必要がある 前処理が必要 視野（観察可能範囲）が狭い	吸光係数がが必要 未知物質の同定の場合、極大波長や、吸光曲線の形が分かっていないと、同定ができない	モデリングによる解析が必要 計測精度が悪い 膜厚が 10nm 以下の薄膜では $n$ と $d$ の区別が付かなく、解析が難しい	薄膜の屈折率が既知である必要 角度特性が低い 使える対象物が限られる 傾き補正が必要 XY 計測の分解能が低い 振動に弱い

分光干渉法では、計測範囲は広いが、単点ごとに計測するため、計測に時間がかかる。そして、屈折率が既知である必要があるし、外部の影響も受けやすい。

エリプソメトリーは、高感度の利点があるが、計測結果は外部（屈折率の不均一性）からの影響を受けやすく、膜厚を求めるために、複雑な数学的モデルも必要である。薄い膜厚を計測することは得意であるが、 $15\mu\text{m}$  以上の膜厚を計測することはできない。

白色干渉法により、これまでは、厚い透明膜の膜厚を計測することが得意であるが、 $50\text{nm}$  以下の膜厚の計測が保障できない。しかし、分光干渉法とエリプソメトリーの点ごとに計測方法と違って、面ごとに計測できるため、高速に計測することが可能である<sup>19,20,21)</sup>。

今後透明電極 ITO 膜厚は徐々に薄くなっていくことが予見できる。製品の性能を保証するため、透明電極 ITO 膜厚の均一性の制御がより重要になる。

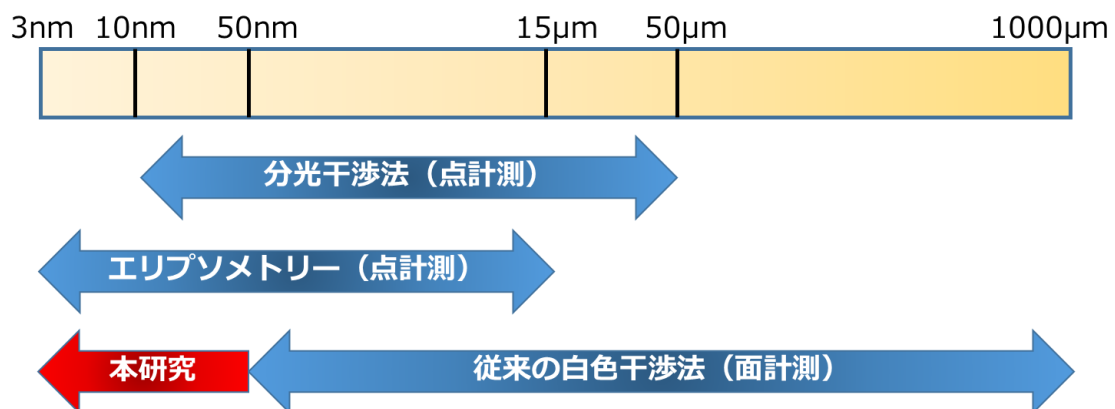


図.1.13 光学的な膜厚の計測方法の計測範囲

以上の長所と短所を考えるから<sup>22,23)</sup>、本研究の目的は白色干渉法により極めて薄い透明電極 ITO 膜厚を計測することである。

本研究の目的は、図.1.13 に示すように、白色干渉に基づいて、新しいアルゴリズムを開発して、高速に数 nm から、 $1000\mu\text{m}$  の膜厚までの計測範囲の拡大を実現することである。

透明膜の膜厚を計測するための光学式計測法は他の具体的な方法がある。本章では、簡単に紹介して、第二章には具体的な方法と比べて、詳しく利点と欠点を分析することが予定である。

## 第二章

# 白色干渉計測の原理

白色干渉計測の原理を説明するため、二つの波長の光がある場合を考える。それぞれの光が波長に応じた周期を持つ干渉縞を作り、光路差がゼロになる点を中心として分布している。白色干渉計測とは、これを利用して透明電極 ITO 膜の表面形状と膜厚を求めることである。

白色干渉による光強度のピーク位置を求めることを基本原理として、単純に干渉強度の変動波形からのピークを探す方法がコントラスト法である。このコントラスト法は光源のノイズの影響を受けやすく、計測感度も 10nm 程度が限界であった。そこで、干渉強度のデータ処理プロセスである FDA アルゴリズムを走査型白色干渉計に採用した。粗面や段差面の計測だけでなく、超精密加工面 ITO 膜の計測にも適した膜厚の分解能を実現した低ノイズのシステムとなっている。

白色干渉法は、光干渉において、白色光がレーザー光と違いコヒーレンス長が短いために干渉縞が狭い範囲にしか現れなくて、更に、参照ミラーを走査すると、生じた干渉縞の解析により、透明電極 ITO 膜厚を求める方法である。本章では、その原理について説明する<sup>17,23,24,25</sup>。

## 2.1 白色干渉計測の概要

超精密加工面 ITO 膜の分野では、計測技術および装置を開発した<sup>17,26,27</sup>。

一般に、表面形状と表面性状の評価計測には、原子間力顕微鏡 (AFM)、光触針法、走査型電子顕微鏡 (SEM)、走査型トンネル顕微鏡 (STM)、共焦点顕微鏡、位相シフト干渉法 (PSI) などが広く知られている。それぞれに、特徴があり、評価目的にあったものが様々な工業界で使用されているが、一台の計測機ですべての評価ニーズを満足させるのは困難である。

以下で、非光学的計測方法と光学的計測方法により、超精密物体の三次元表面形状を計測する代表的な手法および装置を挙げて、白色干渉法と比較を行ってみる。

### 1、原子間力顕微鏡 (AFM : Atomic Force Microscope)

原子間力顕微鏡は探針と試料に作用する原子間力を検出するタイプの顕微鏡である。接近する物体間には必ず力が働くが、これを原子レベルで調べる装置が AFM である。AFM 探針は、片持ちバネ (カンチレバー) の先端に取り付けられている。この探針と試料表面を微小な力で接触させ、カンチレバ

一のたわみ量が一定になるように探針と試料間距離をフィードバック制御しながら水平（X、Y）に走査することで、表面形状を画像化する。コンタクトAFMモードは多機能型SPMの基本になる計測モードで、カンチレバー種類や信号検出の方法を変えることにより、様々な物性計測が可能となる。この力を計測しながら、試料あるいは探針を二次元的に走査することで、試料表面の形状が得られる<sup>28,29)</sup>。

## 2、光触針法

光触針は光ピックアップと同様の光学系を内部にもち、被計測面との相対変位に応じてフォーカス信号を出力する。このフォーカス信号を利用して、被計測面との距離を常に一定に保つ制御をフォーカス制御と呼ぶ。フォーカス制御を行ないながら被計測面を走査し、その時のステージの動作軌跡をレーザー測長器で計測することによって、形状データを取得する。機械的に接触する触針子に変わって、光を用いた非接触の触針子を使用した計測方法である。CDなどの光ピックアップにも利用されている<sup>30,31)</sup>。

## 3、走査型電子顕微鏡（SEM：Scanning Electron Microscope）

走査電子顕微鏡は、真空中で細く絞った電子線で試料表面を走査し、その時試料から出てくる信号情報を検出して、モニター上に試料表面の拡大像を表示する電子顕微鏡である。真空中に置かれた試料上に、1nm以下に絞った電子線を密になぞるように動かすことで計測を行う。真空中で電子線を試料に照射すると、二次電子が試料から放出される。その他に試料から反射電子や特性X線等も放出される。走査電子顕微鏡では、主に二次電子または反射電子の信号を用いて像を表示する。二次電子は試料の表面近くから発生する電子で、検出して得られた像は試料の微細な凹凸を反映している。そして、反射電子像は試料の組成分布を反映した像となる。走査電子顕微鏡は試料形状の観察だけでなく、その試料にどんな元素がどの程度含まれているかを調べるX線分析装置としても活用できる<sup>32,33)</sup>。

## 4、走査型トンネル顕微鏡（STM：Scanning Tunneling Microscope）

走査トンネル顕微鏡は、物質表面の個々の原子や電子状態を観察できる最先端の顕微鏡である。先端の鋭い探針を用い、探針直下の試料の情報を取り出す仕組みになっている。探針と試料間の空間的な位置関係は、圧電素子（ピエゾ素子）を用いて、探針が試料をオングストローム（ $1\text{\AA} = 0.1\text{nm}$ ）以下の尺度で高精度に制御することによって行われる。得られる情報は、探針で取り出される信号の種類に依存し、多くのプローブ顕微鏡が実現されている。原子のオーダーで、先のとがった針を試料表面に数Åになるまで近づけ、探針と試料との間にできる真空障壁の高さより、低い電圧（数ボルト以下）で、真空障壁をトンネル効果で通過する電流を検出して画像にする方法である。表面と探針の間を流れるトンネル電流が障壁間の距離に対して指数関数的に依存するため、STMの分解能は原子オーダーに達する<sup>34)</sup>。

## 5、共焦点顕微鏡（CM：Confocal Microscope）

共焦点顕微鏡の原理かつ最大の特徴として、共焦点光学系である。共焦点（コンフォーカル）光学系は検出器でサンプル表面からの反射光を受光する光学系である。共焦点光学系とは、光源ピンホール（点光源）と検出器ピンホール（点検出器）が、ある物点に対して共に共役な関係にあるような光



学系のことをいう。上記2つのピンホールをまとめて共焦点ピンホール、その共役な物点を焦点と呼ぶことにする。点光源から照射された照明光がサンプル表面に焦点を結ぶ時に、その反射光も検出器上で焦点が合う。試料中の特定の面に焦点を合わせて、その上下の焦点があっていない面からの光を排除し、走査することで三次元形状を得る方法である。

面計測ではあるが、その範囲は極めて狭くて横方向のスキャンが必要になる。また、縦方向の精度が低い<sup>35,36)</sup>ため、本研究には適さない。

## 6、位相シフト干渉法 (PSI : Phase-shifting Interferometry)

位相シフト干渉法は、干渉計の参照光と信号光の間に任意の位相差を与えた時の干渉強度の変化を計測することにより、参照光と信号光の位相差を算出する。これらのイメージング像から算出された位相差を高さの情報に変換することで、高分解能イメージングが取得できる。位相シフト干渉法は従来の光干渉計測法として、干渉縞の位相を変化させて数回 (3~5回) の計測を行って、その位相変化から微小な凹凸と膜厚の計測が<sup>37,38,39)</sup>なる。

位相シフト干渉法は、レーザー光、X線、放射光の分野では古くから用いられており、高さ方向の空間分解能が波長の数百分の一程度まで実現できるという特長を有する<sup>40,41,42)</sup>。

位相シフト法を用いた光干渉計測であるが、高精度な半面、不確定性が存在する。不確定性とは、計測対象に大きなギャップが存在する場合、干渉縞の位相では $2\pi$ 以上のギャップの情報を得ることができないため正確な形状情報が得られないことをいう。そのため、位相シフト法では使用光源の波長よりも大きなギャップのある物体を計測することができない<sup>37)</sup>。

表2.1に、代表的な表面計測方式の機能比較をまとめる。白色干渉方式の特徴も明確であり、なかでもZygo手法の垂直分解能の優位性が特出すべき点となる。

表 2.1 表面計測方式の機能比較

計測方法	触針式 プロファイラー	原子間力顕微鏡 (AFM/SPM)	走査型電子顕微鏡 (SEM)	共焦点顕微鏡 (CM)	白色干渉
非接触 非破壊	×	×	×	○	○
原理	接触する触針子 に変わって光触 針になった	探針と表面原子 の間に引力と斥 力を分析する	電子ビームとサ ンプルの間の相 互作用により分 析する	共役の原理によ り解析する	光干渉の原理 (FDA 解析)
縦方向分解能	1nm	1nm	10nm	1nm	0.1～1nm
横方向分解能	1μm	200～500nm	1nm	1μm	0.5～1μm
定量的三次元エ リア計測 (x, y, z)	×	○	×	○	○
最大計測エリア (1 回計測領 域)	～25mm (Line trace)	～100μm	1mm	～0.5mm	10mm (Larger with stitching)
最大計測高さ (z) レンジ：ステッ プハイト	～5000μm	5～10μm	N/A	<5000μm	≤5000μm
垂直分解能 (z) (Out-of-plane)	0.1～50nm	0.05nm	N/A	0.6μm	2～3nm (～0.1nm)
水平分解能 (x, y) (In-plane)	～300nm	～15nm	2nm	～500nm	～500nm
計測スピード	△	×	△	△	○
計測方式	点計測	点計測	面計測	面計測	面計測
利点と欠点	大気中	試料の制約が少 ない、計測環境 が簡単だ 大段差を計測で きない	真空中、横方向 の走査が必要だ	大気中 高い精度の焦点 を合わせるシス テムを要る	次節に説明する

白色干渉計測法は、高輝度白色光源を用いて試料表面を「広視野、高垂直分解能、広ダイナミックレンジ」で非接触、非破壊の三次元計測が可能な装置である。

白色干渉法 (WLI 法: White Light Interferometry) は、垂直走査法 (VSI 法: Vertical Scanning Interferometry) など、様々な呼び方があり、共焦点顕微鏡との類似点も多く存在する計測方法である。この方法はほかの計測方法であるが、位相シフト干渉法と比べると精度は一桁悪く、スキャンに時間もかかるといった欠点がある。しかし、位相シフト法の大きな欠点である、不確定性は存在しない<sup>17)</sup>。

## 2.2 白色干渉に基づいた高さの計測原理

白色干渉計測を容易に理解するため、単色干渉計測を説明する。

干渉計とは、光源から出た光を二つ以上の光に分割して、別々の光路を通った後にもう一度重ね合わせて、光路差により発生する干渉縞を解析して、サンプルの表面形状などを求めるものである。したがって、干渉計を構成するためには、図.2.1 に示すように、光源、光の分割手段、光の重ね合わせ手段と検出手段が必要である。

基準となる波面は参照波面あるいは参照光と呼ばれ、それを形成するための反射面がある場合には、これを参照面あるいは基準面と呼ぶ。参照波面と被検波面の光路差が波長の整数倍であれば干渉した光は明るくなり、光路差が波長の整数倍から波長の半分だけずれていれば干渉光は暗くなる。場所により光路差が一定でない場合には、明暗の干渉縞が観察される。レーザー光はほぼ理想的な単色光源と考えられて、光源として可干渉性に優れたレーザーを用いるのが一般的であるが、特定の目的のために、単色光（低コヒーレンス光源）や白色光源を用いた干渉計もある。

光の分割手段としては、ハーフミラーなどによる振幅分割が一般的であるが、波面分割や偏光分割などもある。光の重ね合わせ手段は、通常、分割手段と同じ方法が用いられる。また、検出手段としては、現在は一般的にCCDを用いる。

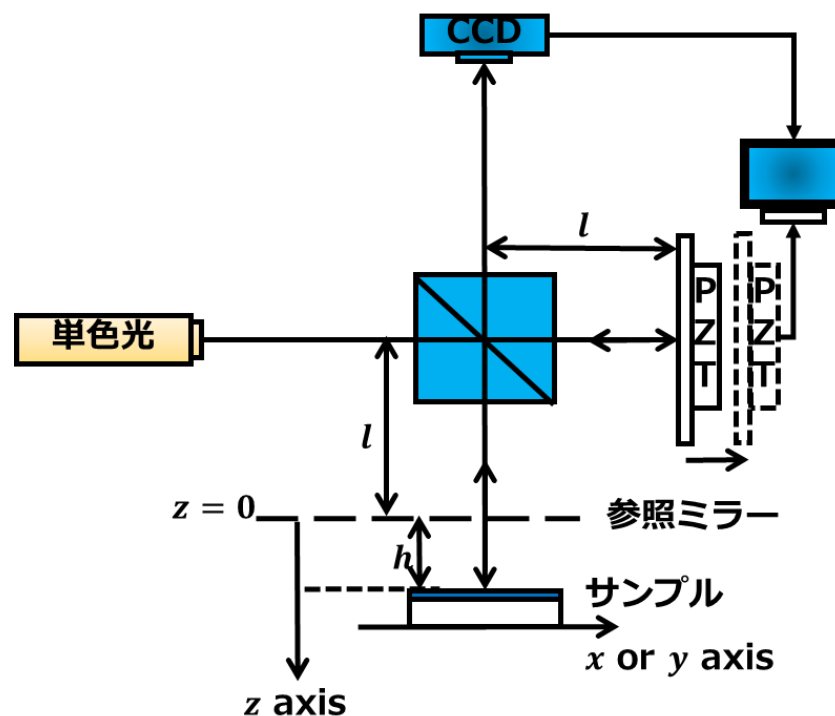


図.2.1 単色干渉計測のシステム

単色干渉式2.1により、図.2.2 のような干渉縞を生じている<sup>43)</sup>。

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos[2k(z - h) + \phi_D] \quad (2.1)$$

ここで、 $I$ は観測点の強度であり、 $I_1$ と $I_2$ はサンプルと参照ミラーから反射光の強度であり、 $k$ は波数であり、 $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ 。 $\phi_D$ は膜内部の反射による位相変化である。

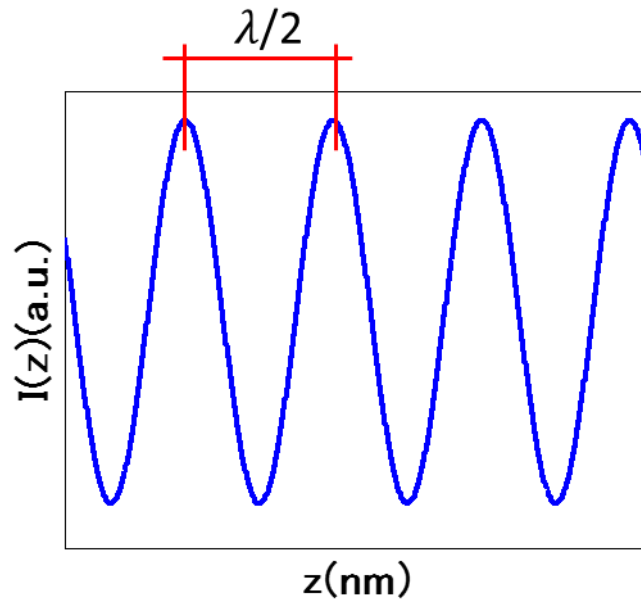


図.2.2 単色干渉計測の干渉縞

単色干渉計測では、段差が $\lambda/2$ よりも大きい場合、不確定性があるため、具体的な段差を明確に計測することができない。したがって、光源には白色光を用いるのが一般的である。

光源のスペクトル分布がある程度以上の広がりを持つ場合、その光は白色光（White Light）と呼ばれる。白色干渉計は単色干渉計の構造とおおよそ同じであるが、図.2.3に示すように、光源は白色光に変える。

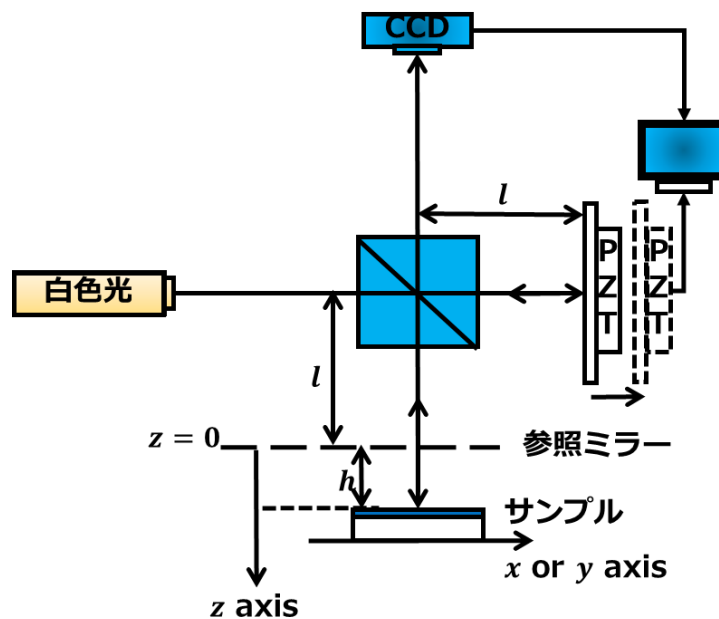


図.2.3 白色干渉計測のシステム

白色光による干渉の場合、その干渉強度は単色光による干渉強度をスペクトルごとにインコヒーレントに足し合わせたものであると考えられる。

例えば、光源が二つの波長の光を含む場合に、それぞれの光が波長に応じた周期を持つ干渉縞を作り、光路差がゼロになる点を中心として分布している。それらの光はお互いにインコヒーレントであり干渉しないため、光路差ゼロの点の付近にはコントラストの高い干渉縞が生じ、その点から光路差が離れるに従ってコントラストが低下した干渉縞が見える。これは白色光のように連続したスペクトルを持つ場合も同様で、光路差ゼロの付近ではコントラストの高い、光源と同じ色の干渉縞が一本現れ、その位置から離れるに従って、干渉縞が多色になると共に、コントラストが急速に低下するようになる<sup>17)</sup>。

このように、白色光のようなワイドバンドスペクトル光源では、光路差ゼロの位置で最もコントラストが高くなるような干渉縞が生じる。その場合の干渉強度は単波長の場合の干渉強度を各波数成分について積分を行うことによって求められる。白色干渉において、白色干渉縞は各波長の単色干渉縞を重ね合わせるので、白色干渉式は式2.2のようになった。

$$I(z) = \int_{k_1}^{k_N} \{ I_1(k) + I_2(k) + 2\sqrt{I_1(k)I_2(k)} \cos[2k(z-h) + \phi_D(k)] \} dk \quad (2.2)$$

ここで、 $z$ は走査距離であり、 $h$ は走査の始めからサンプル表面までの距離である。

簡単のために、二光波の強度が等しく、スペクトルがガウシアン関数であるとする、白色干渉式の式2.2と式2.3のようなコサイン関数とガウシアン関数の積となる<sup>43)</sup>。

$$I(z) = I_0 \left\{ 1 + \exp \left[ \left( \frac{z-h}{l_c} \right)^2 \right] \cos \left( \frac{4\pi(z-h)}{\lambda_0} + \phi_D(k) \right) \right\} \quad (2.3)$$

ここで、 $\lambda_0$ はスペクトルの中心波長、 $l_c$ はスペクトルの幅を表す値である。

これをグラフで表すと、図.2.4に示すようになる。この波形はインターフェログラムと呼ばれ、スペクトルの自己相関関数を表す。これは図.2.4に示すように、単色光による干渉縞の足し合わせであるともいえる。白色干渉において、光路差がゼロになった時に、干渉縞のピーク位置である。白色干渉法はこのインターフェログラムを解析するにより、高さ $h$ と膜厚 $D$ を求める方法である。

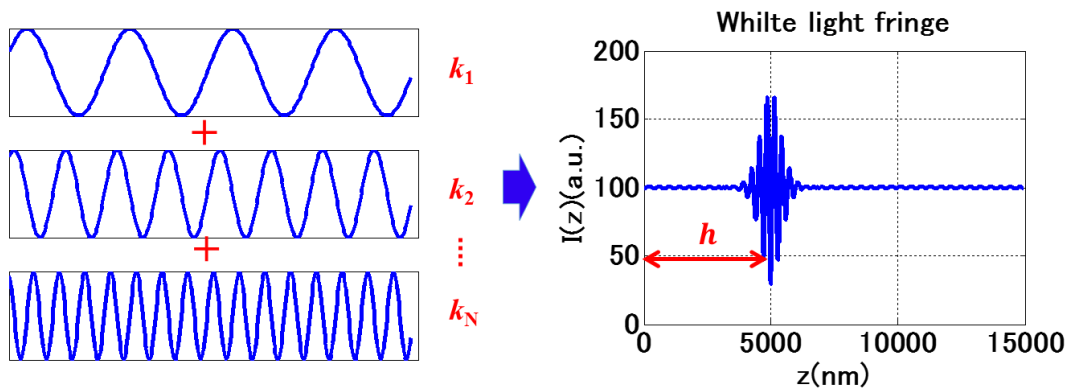


図.2.4 白色干渉計測の干渉縞

単色干渉計に比べて、白色干渉において、干渉強度は光路差によって変化する。

本研究では白色干渉計測により、透明電極ITO膜厚を計測する。このように、白色干渉においては干渉縞が、干渉計の二光路差がゼロになる付近にしか現れない。

インターフェログラムを解析するにより、高さを求める方法は二つに分けられる<sup>23)</sup>。

- 1、インターフェログラムの位相情報により高さを求める方法
- 2、インターフェログラムの強さにより高さを求める方法

本研究では白色干渉に基づいて、インターフェログラムの振幅情報と位相情報を解析することにより、透明電極ITO膜厚や三次元形状などを計測することになる。

### 2.2.1 インターフェログラムの位相情報により高さを求める方法

FDA アルゴリズム (Frequency Domain Analysis) は周波数領域の位相情報を使用して解析するアルゴリズムであり、白色干渉計測器メーカーである Zygo 社が特許を取得して、製品に組み込んでいるアルゴリズムである<sup>44,45)</sup>。

FDA アルゴリズムとは干渉縞の強度変化から、振幅と位相を計算する数学的手法である。FDA アルゴリズムは干渉縞の各周波数領域での位相が一致するに基づいて取り出した。白色光干渉は、いくつかの単色光による干渉強度をスペクトルごとにインコヒーレントに足し合わせとして理解することは可能である。干渉縞の最大値は、各干渉縞の位相が一致する点であるために、各干渉縞の周波数領域とある点の位相によって、ゼロ光路差の点が計算できる。干渉計により、干渉パターンを電子的に位相値の行列に変換できる。これらの位相値は、光源の波長または周波数がわかっている場合には、相対的な高さ値に直接関連することがある。これにより、透明膜の厚さも計測することは可能である。

次には、白色干渉式のフーリエ変換をしてから、位相情報を求める方法を説明する。

白色干渉では様々な周波数の光が連続して含まれているため、図.2.5に示すように、白色干渉のインターフェログラムは、単色光の例よりも複雑である。白色光インターフェログラムの複雑さにも関わらず、個々の空間周波数の位相を抽出することは可能である。これは、フーリエ変換、またはより具体的には、計算効率のよい高速フーリエ変換 (FFT) によって行われる。図.2.5に示すように、高速フーリエ変換された振幅情報と位相情報を得ることは可能である<sup>46,47)</sup>。

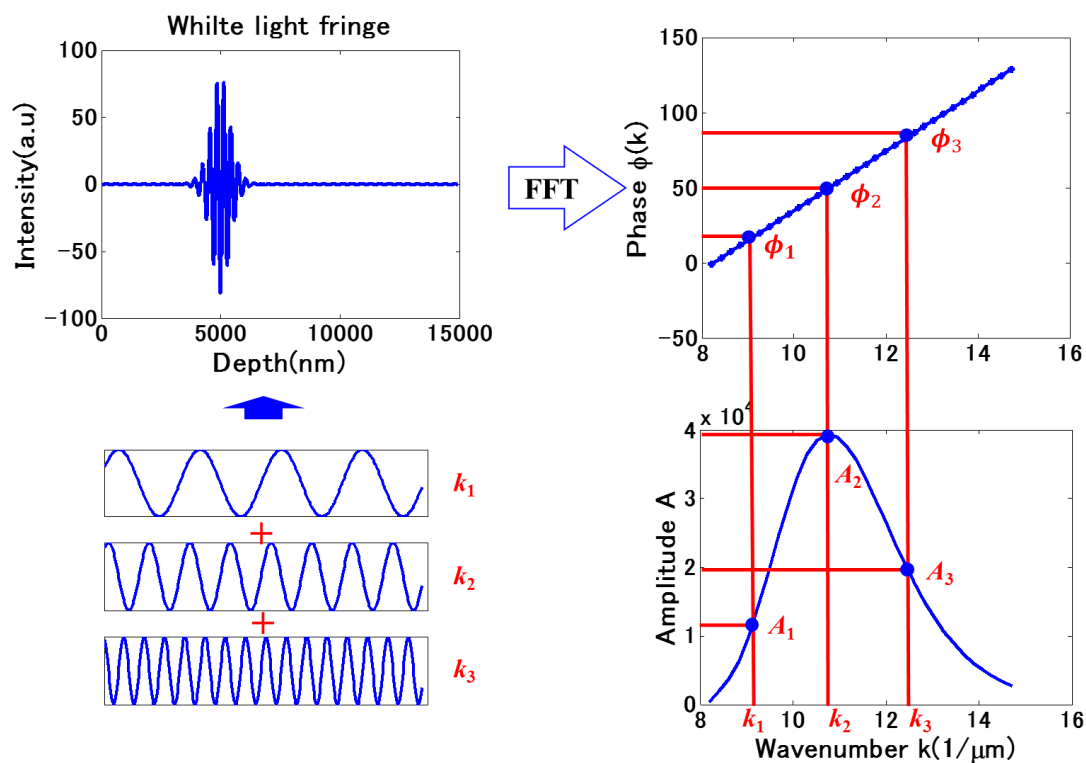
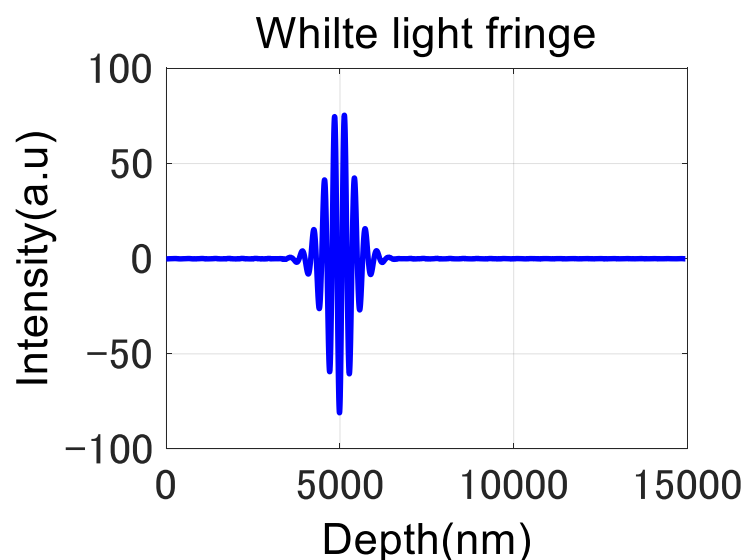


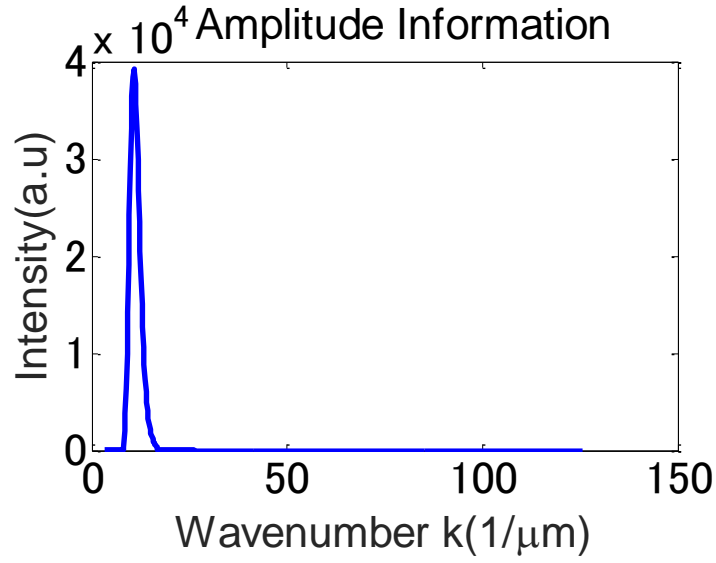
図.2.5 FDA アルゴリズムの概念図

ここで、高速フーリエ変換（FFT：Fast Fourier Transform）の理論基礎を説明することが必要である。高速フーリエ変換は、計算回数を減らすために大量のサンプリングデータの離散フーリエ変換（DFT：Discrete Fourier Transform）をコンピュータで高速に計算するアルゴリズムである。高速フーリエ変換を使って、畳み込み積分などの計算を高速に求めることは可能である。高速フーリエ変換の逆変換を逆高速フーリエ変換（IFFT：Inverse Fast Fourier Transform）と呼ぶ。

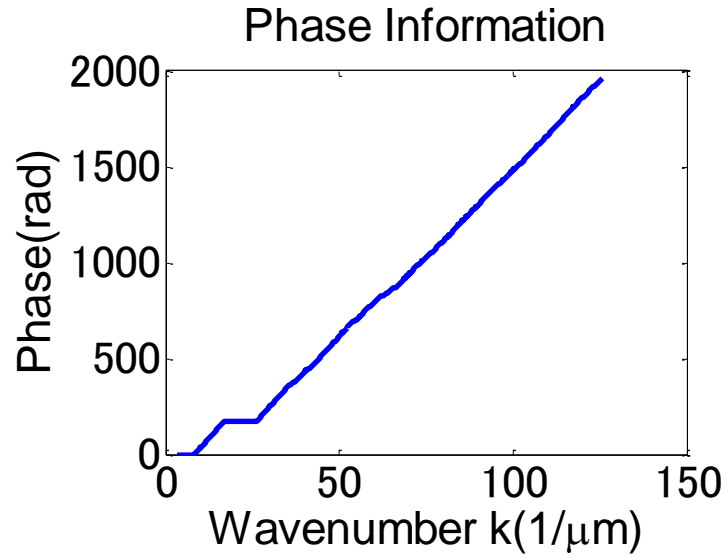
図.2.6 に示すように、白色干渉において、インターフェログラムを高速フーリエ変換してから、振幅情報と位相情報が得られた<sup>16)</sup>。



(a) インターフェログラム



(b) 振幅情報



(c) 位相情報

図.2.6 インターフェログラムのフーリエ変換

振幅情報と位相情報の横軸は波数 $k$ である。

まず、膜なしの場合を考慮すると、膜なし場合に $\phi_D = 0$ になった。

光路差 $h$ から引き起こす位相 $\phi_L(k, h)$ は

$$\phi_L(k, h) = -2kh + \phi_1 \quad (2.4)$$

に書ける<sup>48,49)</sup>。

したがって、膜なし場合の白色干渉式は式 2.5 のようになった。

$$I(z) = \int_{k_1}^{k_N} \{ I_1(k) + I_2(k) + 2\sqrt{I_1(k)I_2(k)} \cos[\phi_L(k)] \} dk \quad (2.5)$$

フーリエ変換してから、白色干渉強度は空間領域の関数を周波数領域の関数に変換した。

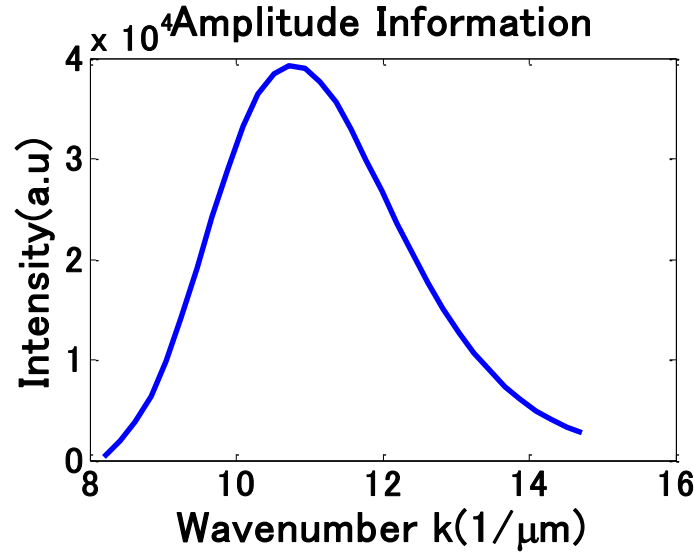
$$F(k) = \int_0^{z_{max}} I(z) e^{-ikz} dz = |F(k)| e^{-i2kh} \quad (2.6)$$



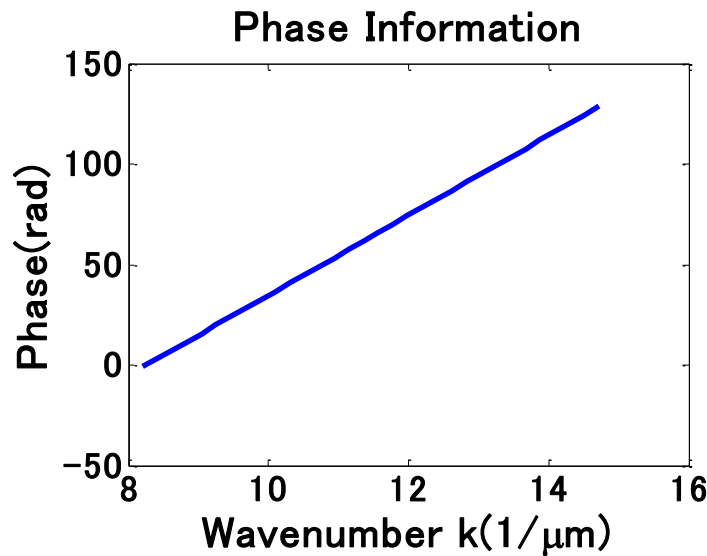
そして、フーリエ変換した関数 $F(k)$ は、 $\cos$ 関数の和であらわせることは可能である。

ここまで、式 2.5 と式 2.6 を比較して、フーリエ変換してから、位相 $\phi_L$ を求めることは可能である。

したがって、白色干渉において、図.2.7 に示すように、白色の波長範囲は 380~780nm であり、高速フーリエ変換してから、振幅情報と位相情報が得られた。



(a) 白色光範囲の振幅情報



(b) 白色光範囲の位相情報

図.2.7 白色光範囲の振幅情報と位相情報

上述の高速フーリエ変換は、本研究でのアルゴリズムを開発する理論基礎である。

膜なしの場合に、白色干渉において、得られた位相 $\phi_L(k, h)$ の公式は

$$\phi_L = -2kh + \phi_1 = L \times k + \phi_2 \quad (2.7)$$

である。

ここで、 $L$ は位相グラフの傾きであり、 $\phi_0$ は他の要因によって引き起こされる位相変化である。

位相 $\phi_L$ は、 $ax + b$ 形の線形関係がよく知られた。このような線形関係は、グラフ形式で容易に表すこ

とができる。インターフェログラムが周波数領域に変換されると、周波数領域のデータ点を通して直線の傾きによって、ピークの位置を求めることは可能である。インターフェログラムのピークの位置はフーリエ変換してから周波数領域の位相情報の傾きと比例になっている。図.2.7 (b) に示すように、空間周波数 $k$ をグラフの横軸として、位相 $\phi_L$ を縦軸とする。従って、位相 $\phi_L$ を知っていれば、走査の始めからサンプル表面までの距離 $h$ と位相グラフの傾き $L$ の関係

$$h = -0.5L + \phi_0 \quad (2.8)$$

を求めることは可能である。

ここで、 $\phi_0 = \frac{\phi_1 - \phi_2}{2k}$ である。

そこで、異なる膜厚（厚い透明膜あるいは段差がある物体）は異なる傾き $L$ があり、この傾き $L$ により各干渉縞のゼロ光路差の点（インターフェログラムのピーク位置 $h$ ）を求めて、各傾きの差値により、表面形状を求めることは可能である。

表面形状解析のための FDA アルゴリズムの利点が挙げられる。

1. 使用可能なすべての干渉データを効率的に使用する。
2. ノイズに比較的鈍感である。（ギャップまたは DC バイアス変動など）
3. 平均波長などの光源特性の変動に容易に対応可能。
4. 色や明るさなどの表面特性の変化に影響されない。
5. 正確で計算上効率的である。

## 2.2.2 インターフェログラムの強さにより高さを求める方法

インターフェログラムの強さにより、高さを求めるの方法が挙げられる。

### 1、最大値をそのまま取る方法（重心法）

重心法はインターフェログラムの強度が最も高いあるいは低い位置を採用する、透明膜の厚さを求める方法である。理想的な白色のインターフェログラムはゼロ光路差点に基づいて、左右が対称になっている。この対称点はインターフェログラムの重心点である。計算が単純で短時間に行うことができる。しかし、計測のサンプリングが十分でなかったり、分散の影響のため干渉縞に偏りがあつたりする場合は、正確な値が出せない<sup>50)</sup>。

### 2、インターフェログラムを復元、合致する方法（SB法）

SBアルゴリズム（Sampling theorem for Bandpass functions Algorithm）は、東レエンジニアリングが東京工業大学と共同で開発したアルゴリズムであり、東レ社の製品に使用されている<sup>51,52)</sup>。

このアルゴリズムは、計測したインターフェログラムに、数学的手法で求めたインターフェログラム（ $\sin$ 関数 $\times$  $\cos$ 関数）を合致させる手法である。合致した時点で数学式からピーク値も同時に求められるため、それにより膜厚が求められる。ただし、干渉フィルタにより光源スペクトルを狭い範囲に帯域制限する必要がある<sup>17)</sup>。

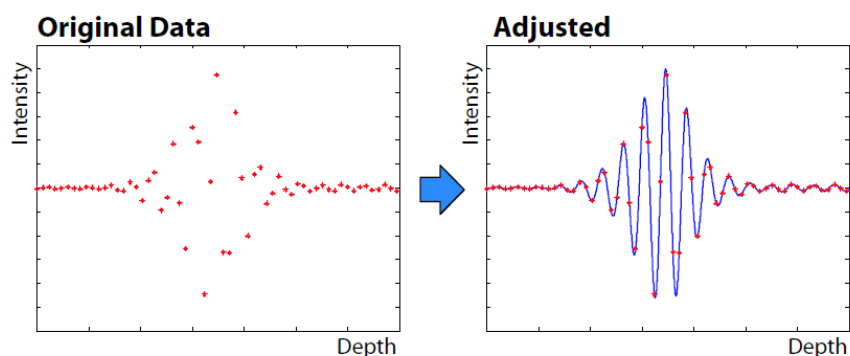


図.2.8 SBアルゴリズムの概念図<sup>17)</sup>

このアルゴリズムの特徴は、データ数が少なくても解析が可能のため、高速な計測が可能であることである。

東レ社のSP-500の特長は以下の通りである。

1. 高精度：nmオーダーの高さ計測分解可能
2. 高速走査：z軸走査速度50 $\mu\text{m/s}$ が可能
3. 二次元カメラによる画面内一括高速計測：計測時間は数秒/画面
4. 広い計測レンジ：高さは最大350 $\mu\text{m}$
5. 視野サイズ可変：対物レン交換により最大視野 数mm $\times$ 数mm

### 3、包絡線を求める方法（ローパスフィルタ法、ローカルサメイション法、フーリエ変換法など）

#### (1) ローパスフィルタアルゴリズム（LPF：Low Pass Filter）

干渉機器メーカーWYKOのCaberの論文にあるアルゴリズムを紹介する<sup>39)</sup>。これはデジタルフィルタリングを使って、インターフェログラムの包絡線を求める方法である。比較的に安定しており、原理も分かりやすく簡単である。具体的には、インターフェログラムの直流成分を除去するために、隣り合う値の差を求める、あるいはインターフェログラムの平均値を全体の値から引く。次に、低周波成分と高周波成分を分離するために、これらの値を二乗する、あるいは絶対値を取る。その結果をデジタルローパスフィルタに通して、こうして得られた値を補間することによって得られる関数が最大になる点を高さとしている<sup>17)</sup>。

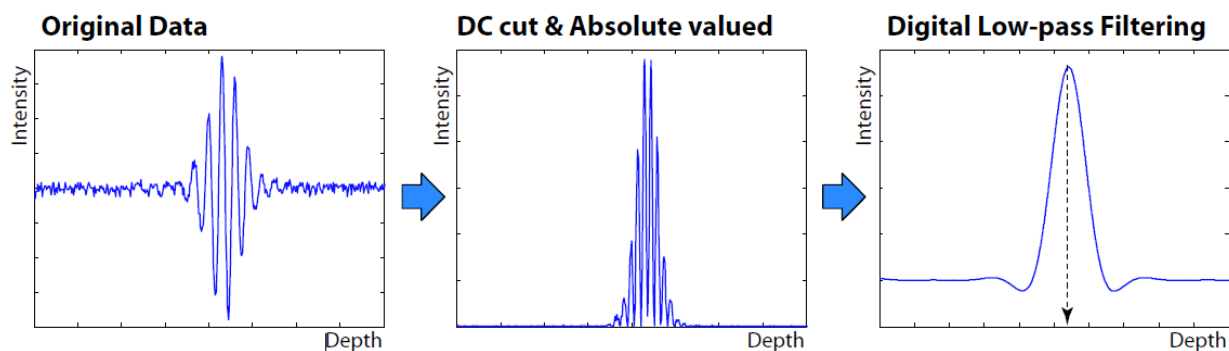


図.2.9 ローパスフィルタの概念図<sup>17)</sup>

## (2) ローカルサメイションアルゴリズム (LS : Local Summation Algorithm)

ローカルサメイション法は、ローパスフィルタ法の特異な形であるといえる。ローパスフィルタ法では、足し合わせる値にフィルタリング周波数に対応した係数をかけているが、ローカルサメイション法ではその掛け算がない。しかし、足し算だけを使用しているため、計算が高速である。また、ローパスフィルタ法はデータにある程度の長さが必要であるが、ローカルサメイション法は一部だけでも計算できるといった利点がある<sup>17)</sup>。

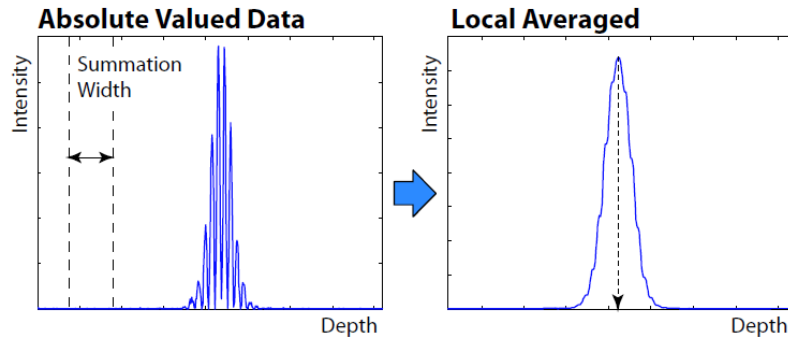


図.2.10 ローカルサメイションの概念図<sup>17)</sup>

## (3) フーリエ変換フィルタリング法 (FTF : Fourier Transform Filtering Method)

フーリエ変換フィルタリング法というのは、フーリエ変換を使ってインターフェログラムの包絡線を求めて、膜厚を計算する方法である。

インターフェログラムをフーリエ変換して、包絡線の成分にあたる周波数部分のみをフィルタリングして、逆フーリエ変換をすることにより、膜厚を求めるものである。

このアルゴリズムは二次のフーリエ変換と逆フーリエ変換を通じて、計算量がすこし大きい<sup>17)</sup>。

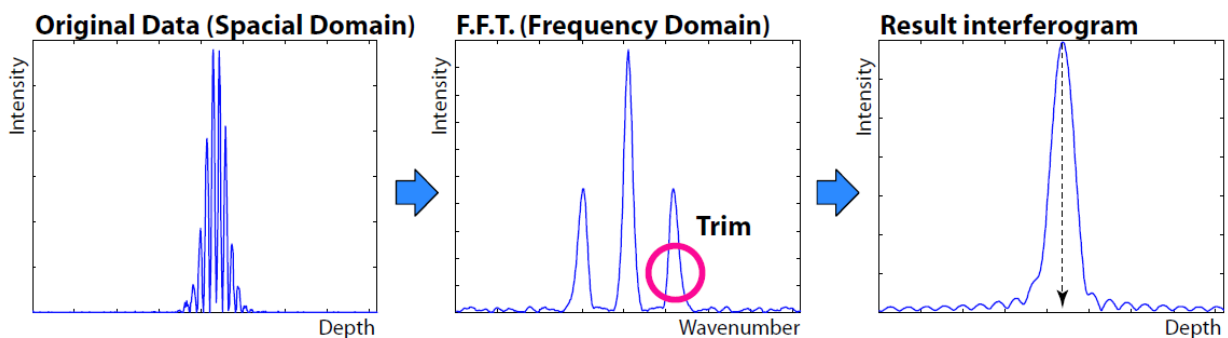


図.2.11 フーリエ変換フィルタリングの概念図<sup>17)</sup>

## (4) ヒルベルト変換法 (HT : Hilbert Transform Method)

ヒルベルト変換法は、多くの場合に狭帯域変調信号の包絡線を抽出する手法を使用されている方法である<sup>56)</sup>。ヒルベルト変換法とは、実信号から解析信号を得るための基礎的手段である。解析信号は複

素数信号であり、実数部は元の信号で、虚数部は元の信号のヒルベルト変換である。ある信号 $I(t)$ から、それと「直交する」信号 $Q(t)$ を導出することである。

$$Q(t) = \text{Hilbert}[I(t)] \quad (2.9)$$

この時、 $I(t)$ と $Q(t)$ は「ヒルベルト変換対」の関係にあるという。

実数信号 $I(t)$ をフーリエ変換すると、周波数軸上においてゼロを対称に正と負の二つの周波数成分が現われる。

$I(t)$ のフーリエ変換 $F(\omega)$ を

$$F(\omega) = F_-(\omega) + F_+(\omega) \quad (2.10)$$

とすると、図.2.12に示すように、正の周波数成分と負の周波数成分の合成であると考えられる。

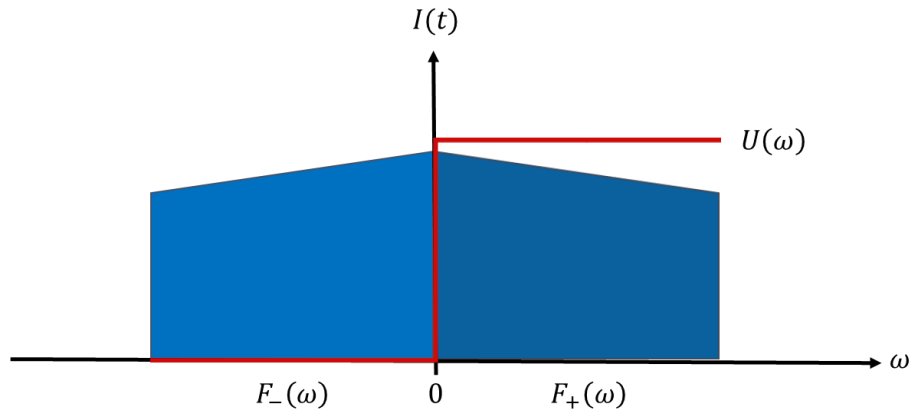


図.2.12 ヒルベルト変換の概念図

信号は変換器を通じて、正負の周波数成分が位相シフトを発生して、信号の幅が変化しない。解析信号 $S(t)=I(t)+jQ(t)$ を得るためには、信号 $I(t)$ に対し、負の周波数成分を除去するフィルタ処理を行えば良い。

このフィルタの伝達関数を $U(\omega)$ とすると、図.2.12のように示される。

$$U(\omega) = \begin{cases} 2 & (\omega \geq 0) \\ 0 & (\omega < 0) \end{cases} \quad (2.11)$$

その時間軸応答 $u(t)$ は、

$$u(t) = \delta(t) + \frac{j}{\pi t} \quad (2.12)$$

であり、解析信号 $I(t)+jQ(t)$ は、 $I(t)$ と $u(t)$ との畳み込みで求められる。

$$I(t) + jQ(t) = \left[ \delta(t) + \frac{j}{\pi t} \right] * I(t) = I(t) + \frac{j}{\pi t} * I(t) \quad (2.13)$$

これより、 $Q(t) = \frac{1}{\pi t} * I(t)$ であることが分かる。これは、 $I(t)$  にインパルス応答が

$$h(t) = \frac{1}{\pi t} \quad (2.14)$$

であるフィルタ処理を行うことにより、直交対である $Q(t)$ を得られることを意味している。この処理を「ヒルベルト変換」と呼び、上記のインパルス応答を持つフィルタを「ヒルベルトフィルタ」と呼ぶ。

これまでに、実信号 $I(t)$ から解析信号 $S(t)$ を得るための一般式を導いた。

ここで、ヒルベルトフィルタの伝達関数 $H(\omega)$  は、 $h(t)$  のフーリエ変換により求まる。

$$H(\omega) = \begin{cases} -j & (\omega > 0) \\ 0 & (\omega = 0) \\ +j & (\omega < 0) \end{cases} \quad (2.15)$$

しかし、このフィルタは $t=0$ で特異点を持ち、結果 $\omega=0$ で不連続点を持つ。このフィルタを実現するには無限のインパルス応答が必要となり現実的ではない<sup>53)</sup>。

ヒルベルト変換を使って実信号を複素時間信号に変換することにより、瞬時振幅と瞬時位相を同時に求めることができ、ヒルベルト変換法の計算量はフーリエ変換とウェーブレット変換を比較して、少し小さい。

#### (5) ウェーブレット変換法 (WT : Wavelet Transform Method)

ウェーブレット変換は、小さい波を拡大縮小と平行移動を適用することで、与えられた入力波形を表現しようとする周波数解析の一つの手法である<sup>24)</sup>。

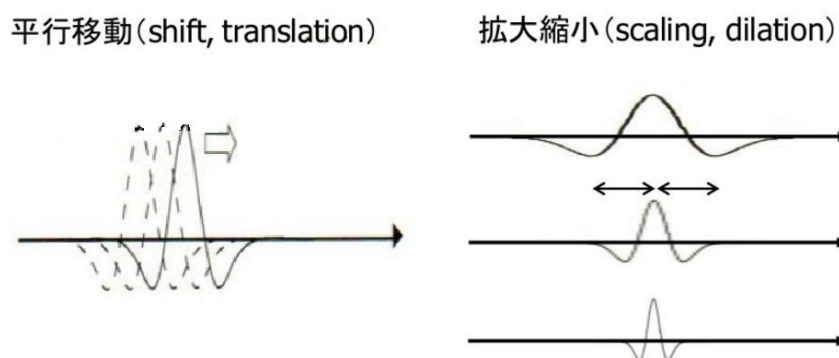


図.2.13 ウェーブレット変換の概念図<sup>24)</sup>

信号解析や画像処理や量子力学など多くの分野に応用されている。基底関数として、ウェーブレット関数を用いる。フーリエ変換によって周波数特性を求める際に、失われる時間領域の情報をこの変換において残すことができる。フーリエ変換でも、窓関数を用いる窓フーリエ変換で時間領域の情報は残せた。しかし、窓幅を周波数に合わせて固定する必要があるため、広い周波数領域の解析には向かなかった。ウェーブレット変換では、フーリエ変換と比較して、基底関数の拡大縮小を行うので、広い周波数領域の解析が可能である。しかし、不確定性原理によって、精度には限界がある。

ウェーブレット変換には、連続ウェーブレット変換と離散ウェーブレット変換がある。連続ウェーブレット変換は、一つのウェーブレット関数を基に、それをスケーリングし、シフトしたものを信号に乗算し、対象時間全体にわたる和を計算する。連続ウェーブレット変換の場合は、信号を無理やり連続ウェーブレット変換式に適用し計算するため、かなりの情報が失われ逆変換ができなくなる。そのため、実用上では、離散ウェーブレット変換がよく利用される。離散ウェーブレット変換は、連続ウェーブレットと比べ、二のべき乗をベースにスケールと位置を選択するものである。元信号を高周波成分と低周波成分に分解し、分解された低周波成分をまた高周波成分と低周波成分に分解するとい

う処理を繰り返し行うことと等価である。

ウェーブレット変換法は隣り合ったスケールに同じ情報が入ると、通過帯域が重なっているため、そもそも変換後に次元数が増えた。ウェーブレット変換法この冗長な表現があるため、計算量は大きい。フーリエ変換法とヒルベルト変換法を比較して、ウェーブレット変換法により、取り出した包絡は信号の中でノイズに対して、スムージングの効果があるために、ノイズが強い場合に、ウェーブレット変換法はフーリエ変換法とヒルベルト変換法より、優れている<sup>54)</sup>。

以上のアルゴリズムで、ゼロ光路差の点を計測することは、直接に白色干渉計測の干渉縞の最大値の点をゼロ光路差の点とする方法を比較して、以下の利点がある。

1. ゼロ光路差点の位置を測る精度が高く、ノイズの影響を受けることが低く、再現性が高い
2. サンプルングレートが高いことは必要ではない

各アルゴリズムの計算精度と計算量は同じではない。本研究は透明電極ITO膜の面上のすべての点を計測することであり、計測速度を向上させるため、計算量を考えることは必要である。これらのアルゴリズムにより、透明膜の厚さを求められるには、いくつかの問題が存在する。アルゴリズムは表面形状と厚膜の厚さを計測する方法であり、薄膜の厚さを計測することが適用できない。次節では表面形状の計測の場合に、代表的な干渉縞解析アルゴリズムを述べる。

### 2.2.3 表面形状の計測の具体例

白色干渉計測法は、前節で見たように、白色光では干渉計の二光波の光路差がゼロになる付近にのみ干渉縞が現れるという特性を利用した計測法である。工業製品の計測に適しているため、現在様々な製品の計測に用いられている。

ここで、位相 $\phi_L$ により、段差がある物体の表面形状を計測する具体例を見てみる。白色干渉計測は面計測のため、断面図を例として、物体の表面形状を計測することを紹介する。

図.2.14に示すように、白色干渉法は垂直走査して、物体の上下表面の各点で、それぞれのインターフェログラムを生じる。フーリエ変換してから、位相情報が得られて、位相グラフの傾き $L$ が求められる。

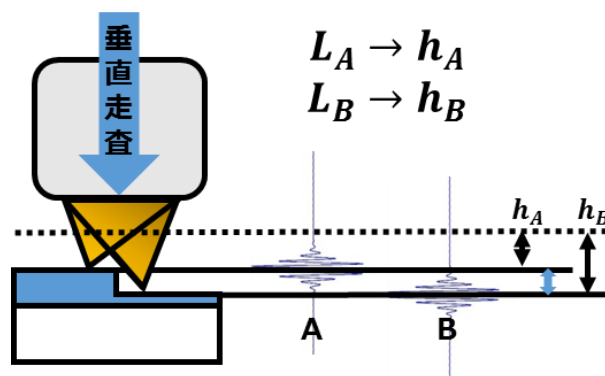


図.2.14 白色干渉法の垂直走査

図.2.15に示すように、段差のある物体を干渉計の一方の経路に置き、参照ミラーを動かす場合を考える。例えば (1) の点で起こった干渉縞は、(1) のようなインターフェログラムであったとする。同様に (2) ～ (10) の干渉縞も (2) ～ (10) のような干渉縞であったとする。この場合に、段差の上面のインターフェログラムのピーク位置と、下面のインターフェログラムのピーク位置の差が、ピエゾを動かした距離と照らし合わせて、例えば $2\mu\text{m}$ であったとすると、段差は $2\mu\text{m}$ であったといえる。

このようにして、観測されるすべての表面上の点でこの計算を行うと、物体の三次元構造が得られるといえる。これが白色干渉計測で三次元構造が計測できる仕組みである。

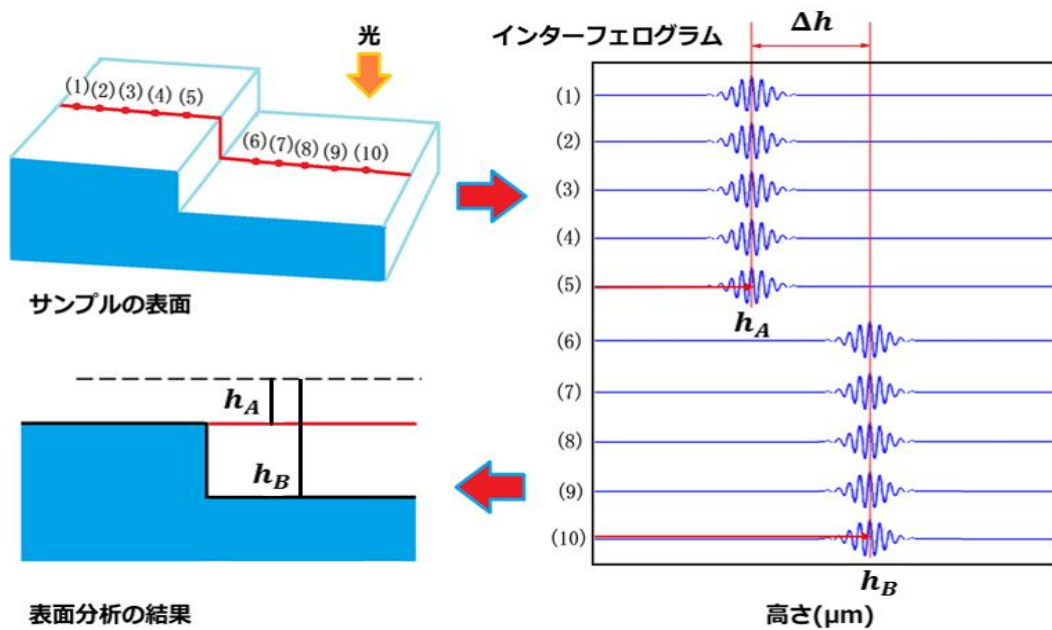


図.2.15 白色干渉に基づいて、表面形状の計測原理

本研究では、膜がある場合に、白色干渉計による膜厚の計測を研究する。

膜がある場合に膜内部の反射による位相変化を生じるために、白色干渉式は式 2.16 のようになった。

$$I(z) = \int_{k_1}^{k_N} \left\{ I_1(k) + I_2(k) + 2\sqrt{I_1(k)I_2(k)} \cos[\phi_L(k) + \phi_D(k)] \right\} dk \quad (2.16)$$

膜内部で、膜厚が変化するにしたがって、干渉縞も図 2.16 に示すように変化している<sup>46)</sup>。



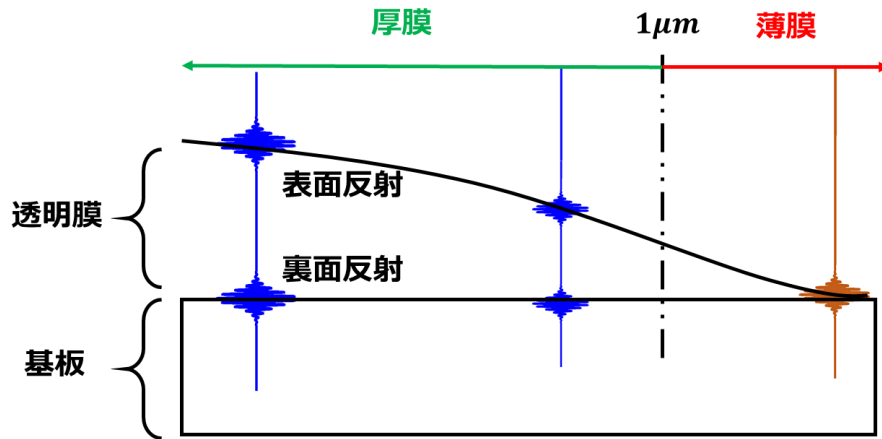


図.2.16 透明膜の分類

透明膜がある場合に膜内部の反射による位相変化を生じるために、膜厚が変化するにしたがって、干渉縞も図.2.16に示すように変化している。二つの種類に分けられる。透明膜の膜厚が約 $1\mu\text{m}$ 以上の場合には、膜表面ピークと裏面ピークが分離して観察できて、厚膜と呼ぶ。その以下の膜厚は薄膜と呼ぶ。薄膜の膜厚ではピークが重なり、分離して観察されない<sup>17,18)</sup>。

本研究は非常に薄い透明電極 ITO 膜厚を計測するため、既存の FDA アルゴリズムにより、計測することができない。したがって、既存の FDA アルゴリズムに基づいて新しいアルゴリズムを開発することが必要である。透明膜の厚さを計測することは第四章に詳しく説明する。

## 2.3 白色干渉計測の特徴

上述の白色干渉計測は他の計測方法と比べて、利点を並べる。

1. 非接触、非破壊
2. 単色干渉計測に比べて広い計測レンジ、不確定性がない
3. CCD カメラを使った面計測であり、点計測に比べ高速である
4. 低ノイズ、コントラストが低い場合でも計測が可能である
5. レーザーではスペckルノイズの出ってしまう粗い面でも計測できる
6. 重ね合わせでランダムパターンは打ち消しあう
7. 大気中で計測できる
8. STM などと比較して、手軽に光学系が作成できる
9. 数角の広視野を、計測可能
10. 広視野をサブナノメートルの高さ分解能 ( $0.1\text{nm}$ ) で計測可能

また、欠点としては次のようなことが挙げられる。

1. 単色干渉計測に比べスキャンに時間がかかり、精度は落ちる
2. 横方向の精度はそれほど高くない

3. 分散の影響を受けやすい
4. 角度特性が低い
5. 使える対象物が限られる

光干渉計はよく反射する面でないと計測が難しいため、様々な対象物への対応が効かない。参照面からの反射光と計測面からの反射光に極端な差があると計測できない事もある。鏡面は得意だが、凹凸の激しい試料や反射率の少ない試料は難しい。

6. 傾き補正が必要である

計測前に、ゴニオ（傾斜）ステージによる試料の傾き補正が必要である。試料が傾いていると干渉縞が密集してしまうため、正しい計測ができない。なお、一部の光干渉式形状計測システムには、自動で試料の傾きを補正するチルト機構を持っている商品もある。

7. XY計測の分解能が低い

サンプリングデータ数が少ない（約30万）ため、XY計測の分解能が低い。一部の光干渉式形状計測システムは、オプションで約98万データまで拡張可能である。

8. 振動に弱い

振動に極めて敏感であるため除振台の設置はもちろん、設置場所も限定される。

上述の非光学的計測方法と光学的計測方法に基づいて、白色干渉法の特徴から、本研究の求められることを満たしており、極めて薄い透明電極ITO膜の計測には最適な手法であるといえる<sup>17)</sup>。

## 第三章

### 白色干渉計による実験システム

本章では、本研究の目的にあった計測を行うために、白色干渉による実験システムを説明する。

#### 3.1 白色干渉計の構成

本節では、本研究で使用する白色干渉計の構成を説明する<sup>17,48,55)</sup>。本研究の白色干渉計測システムの光学系は、図.3.1 のような実験の見取図を示して、大きく分けると、照明系、結像系、干渉光学系部分に分けられる。また、そのほかに走査するため、CCD カメラがあり、コンピュータと接続されている。それぞれに様々な光学系が存在するため、計測の目的に応じて適切な光学系を選ぶ必要があるといえる。

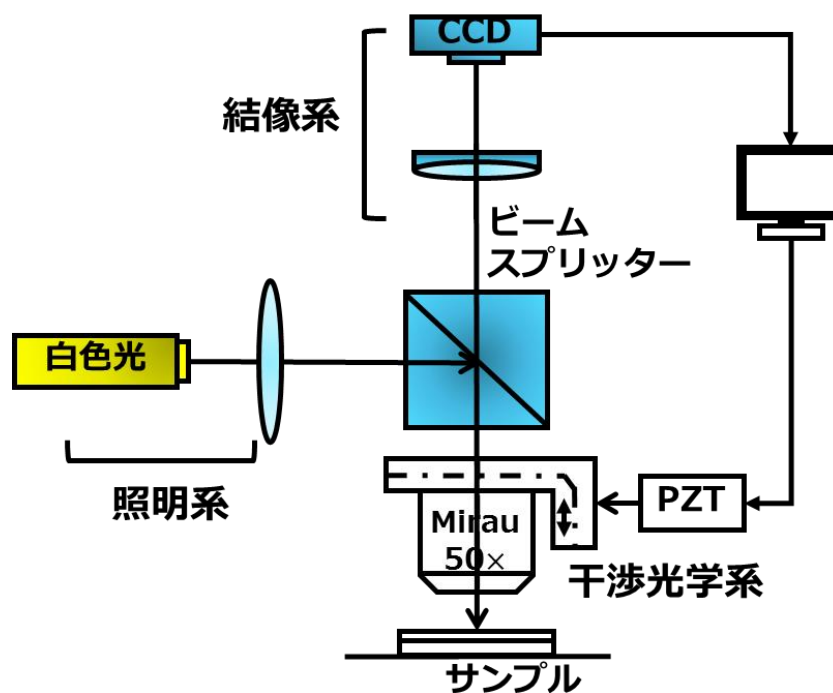


図.3.1 実験の見取図

## 3.2 照明光学系

照明光学系は、多くの場合、被照射面を明るく均一に照射することを目的として設計される。そのため、像を見るための結像光学系とは異なり、必ずしも光源の像を物体面上に作る必要はない。白色干渉実験においても同様のことが言えると考えられる。以下にいくつかの照明光学系を挙げる<sup>56,57)</sup>。

### 1、平行照明

平行照明とは光源の像を無限遠に作り、平行光を物体上に照射する照明である。比較的、広い範囲を照明したい場合に用いる。ただし結像していないため、光源の大きさによっては照射光量の密度は小さくなる。

### 2、クリティカル照明

光源の像を物体面上に作った照明系である。結像しているため照射光量の密度は大きくなるが、照射範囲は光源の大きさと光学系の倍率により制限される。また、光源にむらがある場合は物体面にそのむらが出てしまう。その場合、焦点をわずかにずらして照明する方法である。

### 3、ケラー照明

光源を集光したコンデンサーレンズの像を物体面上に作る照明法である。コンデンサーレンズでむらはなくなるため、像面部にむらは現れない。

干渉実験においては、例えば、物体の反射率が低く光量が足りない場合には、干渉縞のコントラストが悪くなるため、照明系を工夫して集光率を上げ、物体が反射する光量を大きくし、コントラストを上げるといったような利用方法がある。その場合は参照ミラーの光量もさらにフィルタによってカットする必要がある。

なお、照明系が光源の空間的、時間的コヒーレンスに与える影響についてはまだ調査中である。レンズによる収差により、干渉縞のコントラストが影響を受ける可能性が考えられる。照明光学系に要求される項目は照度の絶対的な大きさ、照度の均一性、コヒーレンスの均一性、テレセントリック性がある。

白色干渉計測において、結像光学系で気をつけなければいけないこととしては、まず収差が挙げられる。収差が大きい場合、焦点が合わずぼやけた像が結像されてしまうため、干渉縞のコントラストが低下し、再現性に影響を与えるといったことや、横方向のゆがみが生じるために、正確な形を計測できないといったことが起こりうる。以上のことから、収差は目的に応じて小さくすることが求められる。

結像光学系には主に、1～2枚のレンズからなる単位共役比デザインの光学系が使用される。また、正確な計測が必要な場合には、図3.2のようなテレセントリック光学系が使用される。

テレセントリック光学系は、レンズを通る主光線以外の光をカットすることで、奥行き感の無い画像を結像する光学系である。例えば、通常の結像レンズでは、ある所定の画角を持っているためにレンズに近い距離に位置する被写体のほうが、レンズに遠い距離に位置する被写体よりも大きく見えるといった現象が起きる。また、その位置的な誤差も起きる。これは人間の瞳でも同様で、これにより

奥行きが感じられるのであるが、正確な寸法計測が必要な場合には、この現象は好ましくない。テレセントリック光学系は、画角が限りなくゼロに近いので、被写体の遠近に関わらず、その寸法や位置が正確に再現できる。

結像光学系では、像の倍率も目的に応じて決める必要がある。図.3.2のような二枚レンズ系では、二つのレンズの焦点距離の比が像の倍率となる。

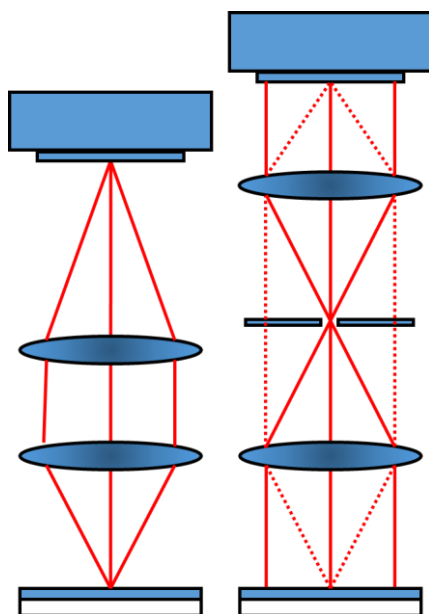


図.3.2 二枚レンズによる単位共役比デザイン

本研究はMoritex会社のハロゲン光源を使用している。光ファイバーライトガイドに最適なハロゲン光源のMegalight100を使用している。それは図.3.3に示すように、スリムでコンパクトなプラスチックケースを採用し、各種の安全規格に対応している。



図.3.3 ハロゲン光源（Megalight100）<sup>58)</sup>

本研究における光源の分光分布特性は図.3.4のように示される。

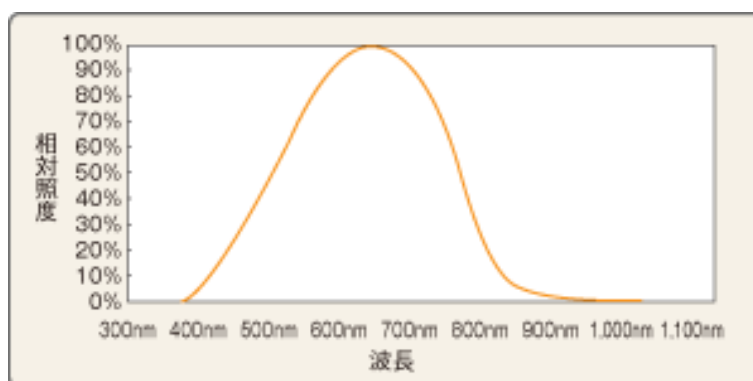


図.3.4 光源の分光分布特性<sup>58)</sup>

Megalight 100は、スリムでコンパクトなプラスチックケースを採用して、各種安全規格に対応したハロゲン光源である。光ファイバーライトガイドに最適で、スポットタイプ、面照射タイプ、ラインタイプ、リングタイプなどを用意する。そして、Megalight100の特性は表3.1に示すように並べている<sup>58)</sup>。

表 3.1 ハロゲン光源の特性 <sup>58)</sup>

形名	Megalight100
ランプ	100W ミラー付ハロゲンランプ
ランプ寿命	1000 時間（平均寿命）
照度	65 万 lx
ランプ電圧安定性	±0.1%以内（入力電圧変動±10%）
入力電源	AC100～120V/200～240V 50/60Hz (本体底面スライドスイッチによる切り替え方式)
消費電力	150W (350VA)
保護機能	温度センサーによる内部加熱保護 入力側、出力側過電流保護
各種機能	外部からの DC0～5V 信号による調光 ランプの切れ検出 外部からのボリュームによる調光 外部よりの 8 ビット調光機能（オプション） 外部からの信号によるランプ ON/OFF メカニカルシャッター（オプション）
カラーフィルタ	容易にカラーフィルタ（オプション）取り付け可能
外形サイズ	120H×76W×235D (mm)
色温度	3100K
重量	約 1.5kg

### 3.3 結像系

CCD イメージセンサー（シーシーディーイメージセンサ、英：CCD image sensor）は固体撮像素子の一つであり、ビデオカメラ、デジタルカメラ、光検出器などに広く使用されている半導体素子である。それは単に CCD と呼ばれることが多い。

CCD の基本構造は、MOS キャパシタを互いに近接して配置することである。CCD は、MOS 構造の半導体デバイス的一种である。シリコン基板表面の酸化膜上に多数の電極を設け、MOS 構造の各電極に隣同士で異なる電圧を与えることによりポテンシャルウェルを作り出す。これを利用して半導体中で電荷を保持と転送できるようにした。各電極に加える電圧を適切に制御することにより、各素子の電荷が隣の素子に転送される。これにより、各素子が保持された電荷をバケツリレー式に順次外部に取り出すことができる。ちょうどデジタル回路の平行=シリアルシフトレジスタと同じ動作であり、アナログ量を扱えるシフトレジスタとも言われる。この性質を利用して、一列の端から入力した電荷を素子数分の転送回数に相当する遅延を持たせて反対側の端から取り出せば、ディレイラインとして動作させることができる。

Basler 社（ドイツ）の Scout シリーズカメラは、解像度とスピード別に豊富にラインナップしている。次世代インターフェースの GigE と IEEE-1394b を採用し、GenICam 規格に準拠した API (Application Program Interface) を搭載し、新たなドライバーを使用している。IEEE-1394b カメラは、Basler 社の既存の BCAM ドライバー、Pylon SDK、及び FireWire カメラ用 API にも使用の互換性がある。ドライバーにある GUI ベースのソフトウェアは、使用者がカメラの各種パラメータを簡単にセットでき、画質調整やカメラの遠隔制御を可能にする。なお、IEEE-1394b カメラへの電源供給は、PC の同バスに接続した FireWire ケーブルから行われる。これに対して、GigE カメラの場合は、アクセサリ製品の 12VAC アダプターを必ず併せている。



図.3.5 scA640-70<sup>59)</sup>

本研究では、BASLER SCOUT IEEE-1394b & GIG-E 出力 CCD カメラモジュールは表 3.2 のように示される<sup>59)</sup>。

- CCD イメージセンサー搭載
- パソコンとの親和性に優れた 2 種類のインターフェース
- 機器組み込みに優れた小型堅牢なハウジングデザイン
- GenICam, GigE Vision, 及び EMVA 1288 規格に適合
- 白黒カメラとカラーカメラをラインナップ
- C マウントデザイン

表 3.2 CCD カメラモジュール<sup>59)</sup>

モデル	scA640-70
センサーサイズ	1/3 型
センサー型番	Sony ICX424
センサーサイズ H×V(mm)	4.8×3.6
有効画素数 H×V	659×490
ピクセルサイズ H×V(μm)	7.4×7.4
フルフレームレート(fps)	71

## 3.4 干渉光学系

干渉光学系は古くから様々な種類のものが考案されている。白色干渉実験では以下に挙げる三つの干渉光学系が主に用いられる<sup>17,60)</sup>。

### 1、Michelson干渉計

Michelson干渉計はAlbert Abraham Michelsonが発明した最も一般的な干渉法用光学機器である。光のビームを二つの経路に分割し、反射させて再び合流させることで干渉縞を生み出す。二つの経路の長さを変えたり、経路上の物質を変えたりすることで、様々な干渉縞を検出器上に生成する。MichelsonとEdward Williams Morleyは、1887年にこの干渉計を使って有名なMichelson-Morleyの実験を実施した。この実験によって様々な慣性系において光速が一定であることが示され、エーテル説が否定されることになった。

対物レンズと物体の間にビームスプリッタが挿入され、光が直交する二方向に分割された干渉計である。ビームスプリッタのために焦点距離に制限があり、対物レンズの倍率は必然的に低いものが多い。



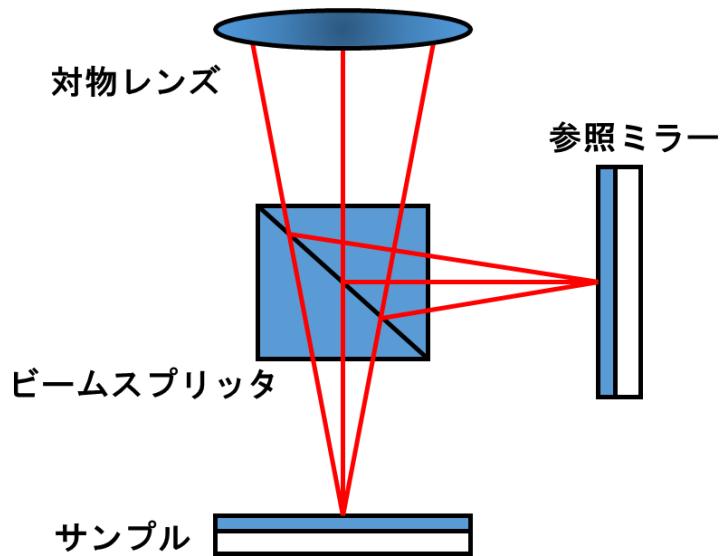


図.3.6 Michelson 干渉計

## 2、Mirau干渉計

Mirau干渉計は対物レンズの中心表面に小さな反射鏡を取り付け、焦点面の途中に半透鏡を置き、観察面からの光とレンズ上の鏡からの反射光が干渉するようにした観察系である。対物レンズと物体の間にハーフミラーと参照ミラーを挿入し、光を同じ光路の中で二つに分ける。レンズ、ハーフミラーと参照ミラーが一つの鏡筒に収められたMirau干渉計用の対物レンズである<sup>57)</sup>。

白色光源を用いるとコヒーレンス長が短いため、僅かな観察面の上下変動でも白色干渉縞の変化として取らえる。これを逆に利用して、干渉縞が常に一定のコントラスト変化を保つようにサンプルの表面形状と膜厚を制御すれば、試料の凹凸情報と膜厚情報が得られるため、光をプローブとした表面形状と膜厚の計測装置などに用いられる。

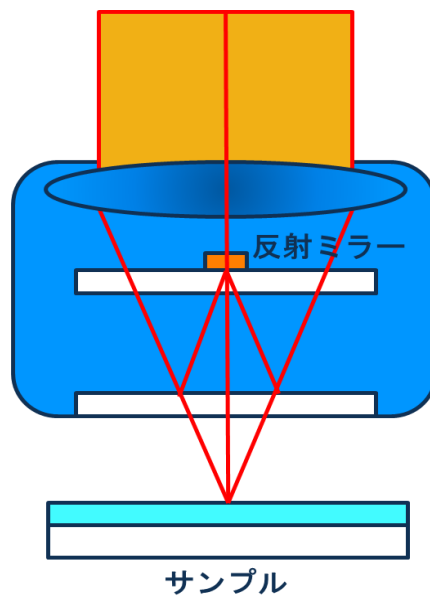


図.3.7 Mirau干渉計

### 3、Linnik 干渉計

Linnik 干渉計は、物体面と参照ミラー面の直前に同じ対物レンズを配置することで、高倍率の計測を可能にした干渉計である。Michelson 干渉計の対物レンズを物体面直前まで移動した形をしている。光ファイバーを使用した干渉実験にも向いている。

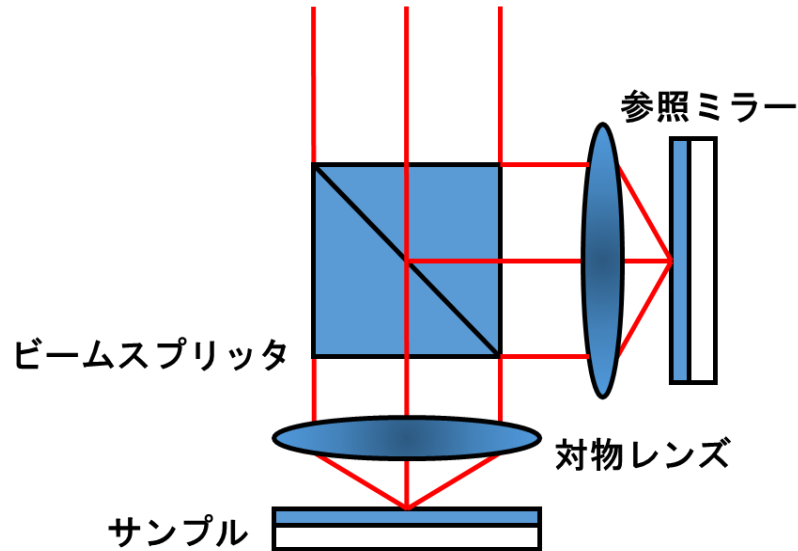


図.3.8 Linnik干渉計

以上の干渉計の利点と欠点は、表3.3に示すようにまとめられる。

表3.3 干渉計の特徴

	倍率	利点	欠点
Michelson	中倍率 (10～50x)	視野が大きい 中心不明瞭がない	放大倍率が低い 作動距離（対物レンズの鏡筒端から 物体までの距離）が制限される
Mirau	中倍率 (10～50x)	共通のレンズ、Linnik干渉計と 比べて振動に強い コストが安い	中心不明瞭がある NAと放大倍率が制限される
Linnik	高倍率 (100x)	N.A.と放大倍率が高い 作動距離が制限されない	ビームスプリッタは作動距離を制限 しない レンズが同じでなければならない、 光学実装がシビア

Linnik、Mirau干渉計は、Michelson干渉計の原理に基づいて発展してくる。本研究で、干渉計はニコンの50倍（ $f=4mm$ ）の二光束干渉対物レンズで、Mirau干渉計を使用している。図.3.10のような白色干渉計測の干渉光学系の構成であり、その中に図.3.9のようなMichelson干渉計を図.3.10のようなMirau干渉計に交換して使用する。

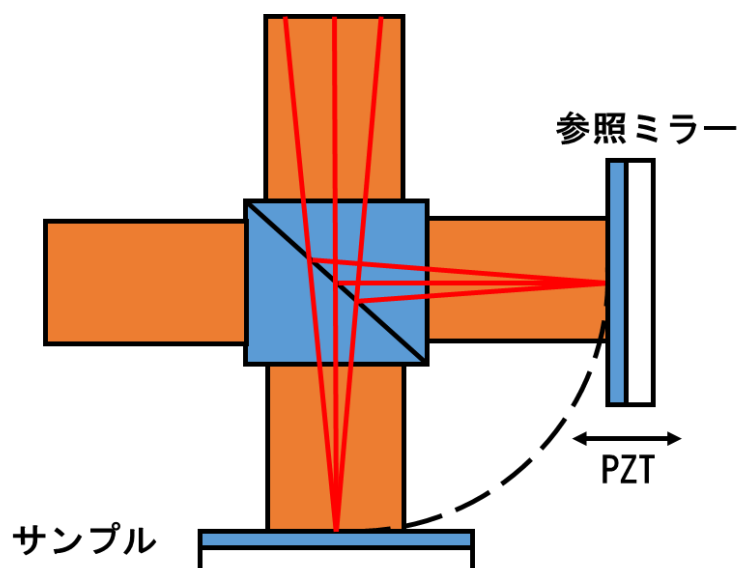


図.3.9 Michelson光学系

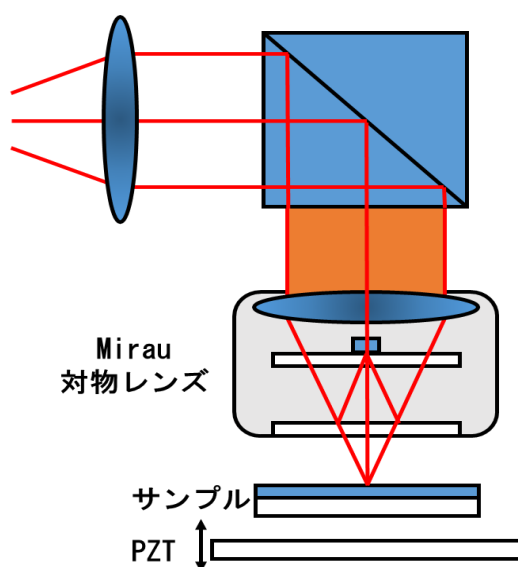


図.3.10 Mirau光学系

本研究で使用されている対物レンズは、図.3.11 のようなニコンの 50 倍 ( $f=4mm$ ) の二光束干渉対物レンズである。

干渉用の対物レンズは、非接触な光学三次元計測を実現する微分干渉顕微鏡に用いられる。サンプル表面の構造的な特徴は、光の波長以下の精度で非常に高精度に調べられる。光学系の中にビームスプリッターが組み込まれており、一部の照明の光はこの素子を透過して被検試料に直射し、残りの照明の光はこの素子で反射して、光学系に同じく組み込まれている参照用ミラーにリレーする。サンプルにから反射して戻ってきた光と、参照用ミラーから反射して戻った光が再び重なり、干渉縞のパターンを形成する。



図.3.11 ニコンの二光束干渉対物レンズ

物体は対物レンズを通じて接眼レンズの前側焦点に結像して、物体表面から前側焦点までの距離は固定である。しかし、本研究で、改造した干渉顕微鏡は物平面から像平面までの距離は無限遠である。

図.3.12 に示すように、無限遠補正光学系と従来のシステムである有限光学系の違いがわかる。

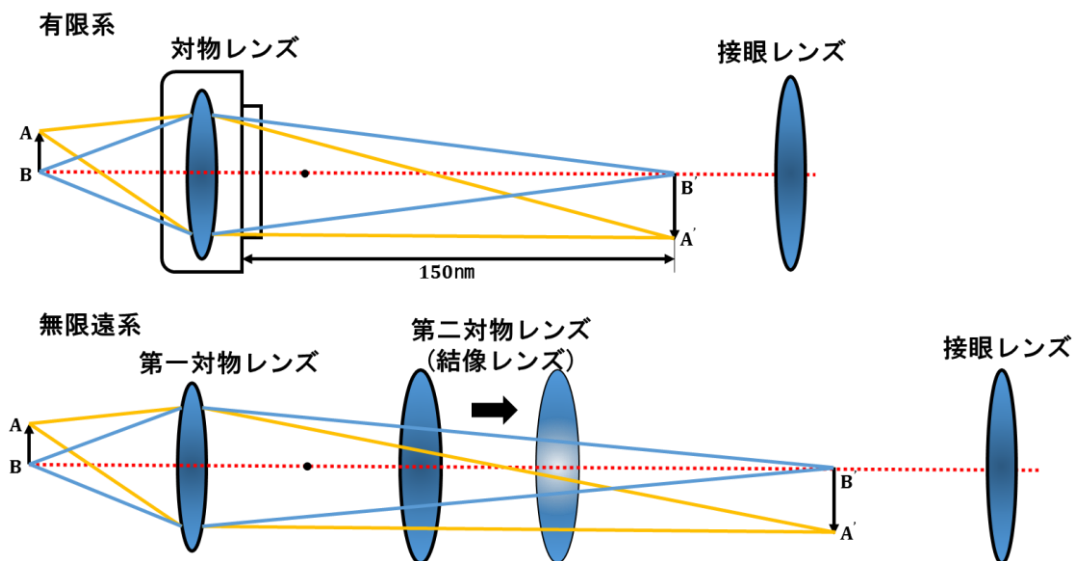


図.3.12 有限光学系と無限遠補正光学系

有限光学系では、試料 AB は、対物レンズの取り付け面の位置から  $150\text{mm}$  の所に結像する。結像位置が  $150\text{mm}$  の場所に固定されているという意味で「有限」なのである。

一方、無限遠のものでは、二つの対物レンズを置いて、光軸上から出た光は第一対物レンズを通過した後、平行光になり、第二対物レンズによって収束する。光は平行に進むから、原理的には第一と第二対物レンズの間の距離は自在に変えられる。その意味で、この方式は「無限」である。

しかし、実際には無限というわけにはいかない。図.3.12 を示すように、光軸外の A から出た光は第一対物レンズを通じて、光軸に対して斜めの平行光束となって進む。このため、第二対物レンズがあまり離れ過ぎると光軸外からの光を捉えきれなくなる。光軸外からの光が作り出す光軸との角度を小さくし、光軸外からの光をできるだけ捉えるために、第二対物レンズの焦点距離を長くする必要がある。

蛍光装置など中間ユニットを光学的な制限を受けることなく顕微鏡に装着するために、第一対物レンズと第二対物レンズの間の空間は広いほど良いからである。最高の光学性能とシステム性を両立させるために、システムでは、第二対物レンズの焦点距離を 200mm としている。これ以上の焦点距離にすると、顕微鏡自体が大型化してしまうのである。もう一つ、システムを特徴づける数値がある。同焦点距離 60mm という数値である。同焦点距離というのは、第一対物レンズから試料までの距離を表して、有限光学系の顕微鏡では国際規格で 45mm と決められていた。45mm の中でレンズの作動する距離を取り、残ったスペースの中に対物レンズを構成するレンズ群をぎっしりと詰め込んでいたわけである。

第二対物レンズの焦点距離を 200mm とすると、第一対物レンズの焦点距離もそれにともなって長くする必要がある。そのため、一部の高性能対物レンズでは、その焦点距離を確保しながら、レンズの作動距離も確保し、光学性能を維持するためには、従来の同焦点距離 45mm では仕様を満たすことがたいへん困難になる。そこでシステムが採用した同焦点距離は 60mm である。

同焦点距離を 60mm とすることで、焦点距離の長い低倍率の対物レンズや高 NA の液浸対物レンズなどでは設計自由度が広がり、視野周辺まで平坦性の優れた光学性能を得ることが可能になった<sup>57)</sup>。

本研究用の干渉対物レンズの仕様は表3.4のように示す。

表 3.4 ニコンの二光束干渉対物レンズ CF IC EPI Plan DI の仕様

タイプ	Mirau	Mirau
倍率	10X	50X
開口数 NA	0.30	0.55
作動距離 WD (mm)	7.4	3.4
焦点距離 FL (mm)	20.0	4.0
分解能 (μm)	0.92	0.5
焦点深度 (μm)	3.04	0.9
実視野 (mm) (@接眼レンズ(視野数 25))	2.5	0.5
実視野 (mm) (@接眼レンズ(視野数 20))	2	0.22
実視野 (@2/3型カメラ; 水平方向)	0.88 x 0.66mm	0.18 x 0.13mm
実視野 (@1/2型カメラ; 水平方向)	0.64 x 0.48mm	0.13 x 0.10mm
マウント	C-Mount	C-Mount
固定用タップ	RMS	RMS
自重 (g)	125	150
メーカー	Nikon	Nikon
RoHS対応状況	適合	適用除外

### 3.5 スキャン駆動システム

本研究では、白色干渉計測のシステムのスキャン駆動は piezoアクチュエータ (PZT) を使用している。piezoアクチュエータとは、piezo圧電効果を応用した位置決め素子で、ナノメートル程度の極めて微小な範囲から数百マイクロメートルまでの位置決めを正確に行うことができる。piezo素子はセラミックで出来ているため非常に硬く、大きな力を生み出すことができ、またコンパクトで省エネルギー製品の基本的要素として、これまでも、またこれからも多くの製品に採用される可能性を持った素子である。

本研究のアルゴリズムは PZT の位相シフトステップに依存しているために、透明膜の膜厚を計測する前に PZT の変位量を計測することが必要である。図.3.13 のような z 軸 piezo スキャナー PIFOC を使用している<sup>61)</sup>。



図.3.13 P-725 PIFOC スキャナー<sup>61)</sup>

P-721 PIFOC は、顕微鏡対物レンズ用の、高速 piezo 駆動ナノフォーカス、スキャン用デバイスである。100 $\mu\text{m}$  のストロークをサブナノメートルの分解能と高いリニアリティ（最大 0.03%）で位置決めて、スキャンできる。

P-721 PIFOC は主な特長と仕様は表 3.5 のように示す。

表 3.5 P-721 PIFOC の特長と仕様<sup>61)</sup>

型名スペックシート LINK	P-725.1CD
本体寸法 (mm)	46×40.5 68
最大径	39
トラベル範囲	460μm
口径	Ø 29 mm
クローズドループトラベルレンジ (μm)	100、250、400
センサー	静電容量
クローズドループ分解能	0.65
リニアリティエラー (%)	0.03
再現性 (nm)	±5
Push / Pull force capacity (N)	100/20
共振周波数 (Hz)	470
剛性 (N/μm)	0.23
クロストーク (nm)	20% 100μm of travel range

Mirau 型干渉計に基づいて、計測の光路の中に、ステージと PZT がつながっている。サンプルはステージに固定して、PZT は計測されたサンプルを推進して、光軸の方向に沿って動くにより、試験アームの光路を変化している。サンプルの戻る光と参照ミラーの戻る参照光は、結像レンズを通じて CCD にインターフェログラムを生じる。段差がある物体を計測する場合を例として、図.3.14 のようなスキャン駆動システムを構成している。

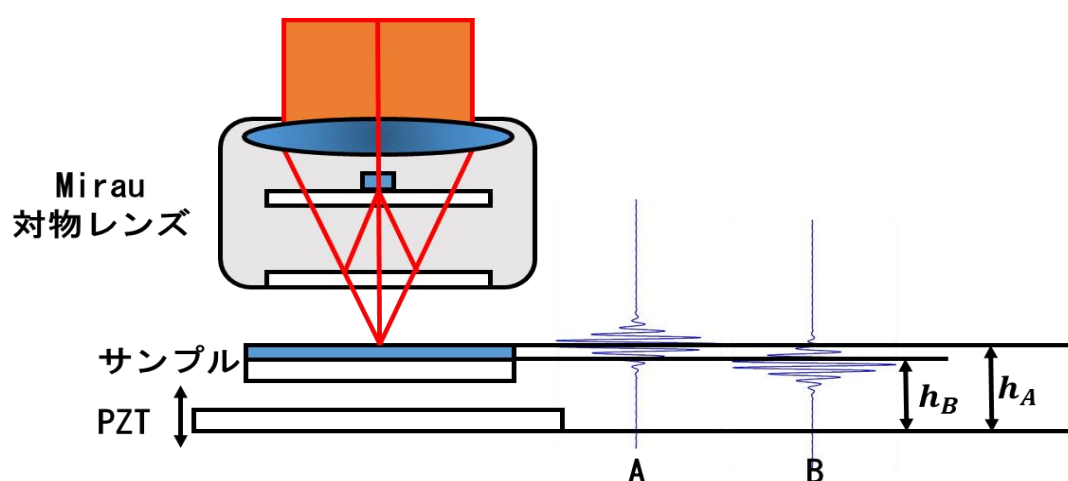


図.3.14 Mirau 型干渉計に基づいてのシステム

PZT は計測されたサンプルを推進して、光軸の方向に沿って動く過程に、サンプル表面の A 点と B 点は光路差がゼロの位置である。つまり、対応する CCD で取ったインターフェログラムの中に A 点と B 点の強度は最大値に達する。

A 点と B 点は光路差がゼロの位置からスキャンを始める位置までの高度は  $h_A$  と  $h_B$  を仮定すると、サンプルの段差は

$$\Delta h_{AB} = h_A - h_B \quad (5.1)$$

である。

改造した Mirau 型干渉計の光路は図.3.14 のように示す。XYZ 三次元調整段階を通じて、サンプル表面の傾斜と XYZ の方向の位置を調整できる。コンピュータによって、PZT は計測されたサンプルを推進して光軸の方向に沿って動いて、CCD で取ったインターフェログラムは、画像取得カードでコンピュータに取り込まれる。

以上のシステムを述べるにより、PZT 変位計測の原理の流れは図.3.15 のように示す。

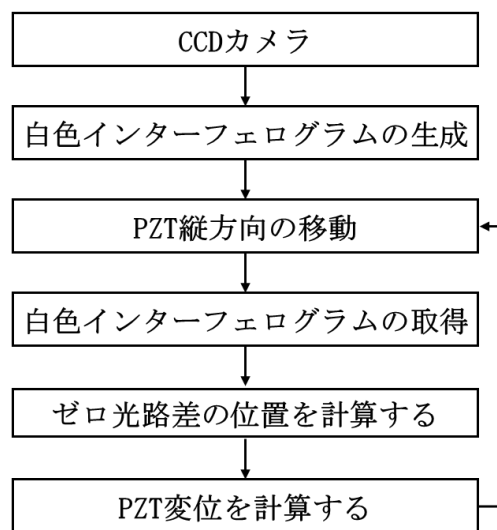


図.3.15 PZT 変位の計測

## 3.6 画像を取り込むシステム

本研究では上述の走査を行うために PZT を使用している。レンジは  $100\mu\text{m}$  である。A/D コンバータによりコンピュータと接続し、制御を行っている。また、センサーは 1/3 インチ 8bit モノクロ CCD カメラを使用している。ピクセルサイズは  $659 \times 490 \text{ pixel}$ 、セルサイズは  $7.4\mu\text{m}$ 、感度は可視域である。

計測に使用するコンピュータはメモリ 4GB、OS は Windows10 を使用している。計測ソフトは MatLab ソフトウェアにより作成したもの、解析ソフトも現在のところ、Matlab ソフトウェアを使用している。

ここでは、図.3.16 に示すように、実際の計測における具体的な手順の流れを説明する<sup>17,48,60</sup>。



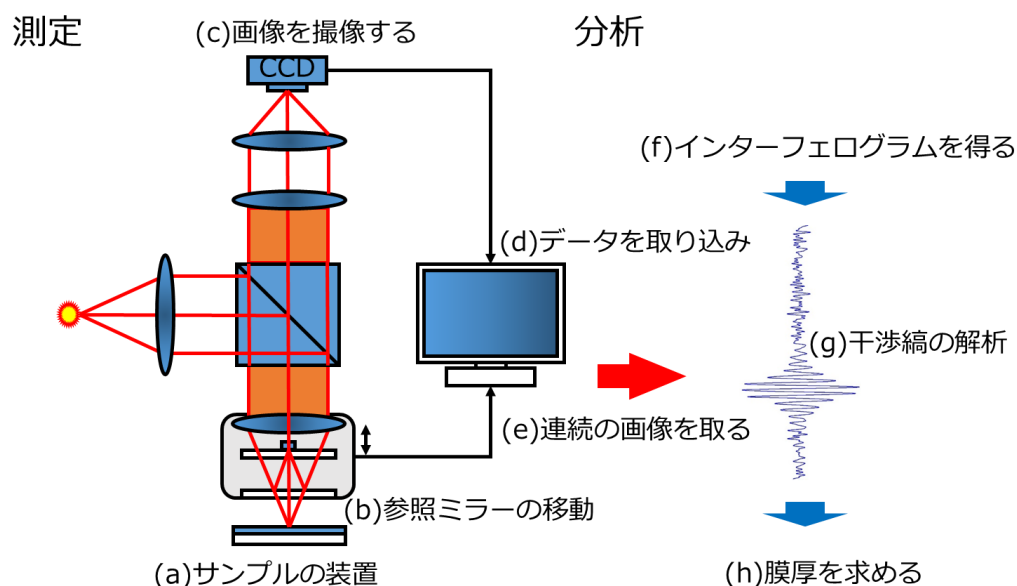


図.3.16 計測の流れ

(a) 計測時にはまず、干渉計の一方に計測したい物体を置く。

(b) そして、手動で物体の距離を調節して、干渉縞が現れる付近にあわせ、次に参照ミラーの移動による走査を始める。

(c) この時に、ピエゾの動作と、CCD カメラのフレーム取り込みを同期し、スキャンステップごとに露光時間に CCD カメラで撮像が行われる。

(d) CCD カメラから取り込まれたデータは画像情報としてコンピュータに取り込まれる。

(e) これを干渉縞がなくなるまで続けることで、計測データが得られる。

(f) 次にデータ解析にうつる。計測したすべての画像は三次元データに変換されます。そして、インターフェログラムを導き出す。

(g) 干渉縞を解析し、アルゴリズムによって計測する

(h) 膜厚が求められる。

ただし、この方法では計測範囲の大きさによっては処理するデータ量が膨大となってしまうため、データ取り込み時に自動的に、ピクセルごとにインターフェログラムの形が現れる部分（コントラストが高くなる部分）と、その位置情報のみを保存することで、データ量を減らす方式も開発されている。

実際に使用しているハロゲン光源のスペクトルによると、インターフェログラムの周期はおおよそ 200nm となる。それによるとピエゾのスキャンステップはおおよそ 15nm 程度でナイキスト周波数よりも十分に大きなサンプリングが行われることになる。本研究ではピエゾのスキャンステップは 15nm～60nm 程度で行った。

上述より、白色干渉計はユーアイ技研 WLI-100 を使用している。本研究の実装の構成は図.3.17 のように示す。

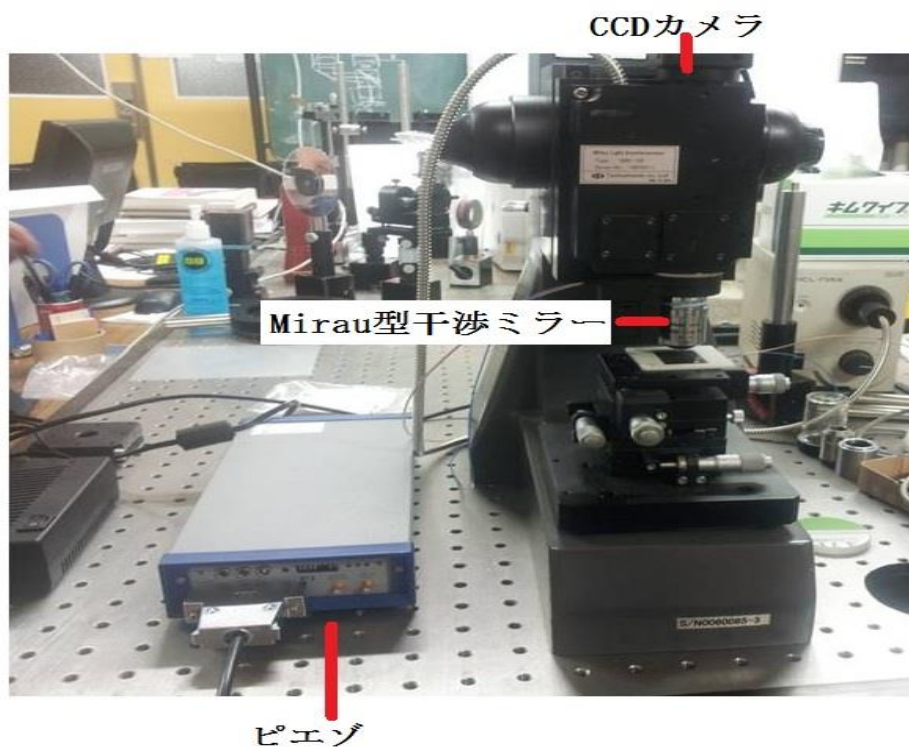


図.3.17 実際の光学系写真

### 3.7 白色干渉インターフェログラムの取得

本研究では、白色干渉に基づいて透明電極 ITO 膜厚を計測するので、サンプルの三次元データを得ることが必要である。つまり、サンプル表面各点のインターフェログラムを得ることが必要である。

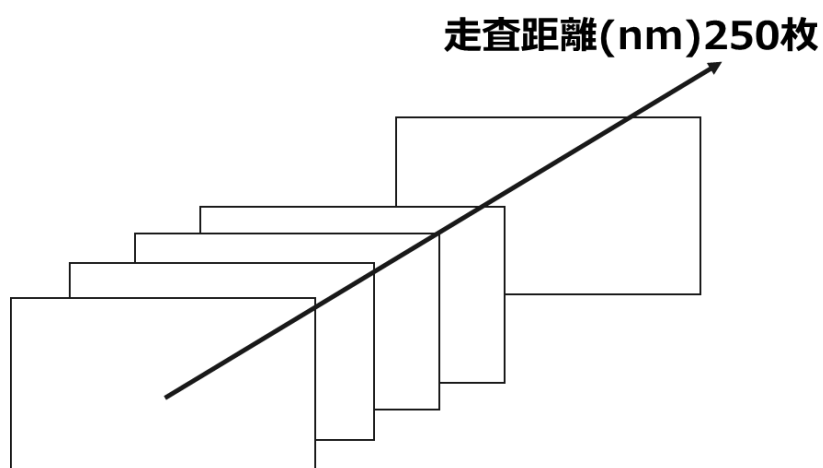


図.3.18 サンプルのサイズ

サンプルのサイズは 200pixel×100pixel×250 枚であり、第一枚から 250 枚まで三次元データを走査すると同時に、コンピュータでサンプル表面各点のインターフェログラムを取り込んで、観測点 A を例とし

て、図.3.19 のようなインターフェログラムが生じられた。横軸は走査距離であり、縦軸は干渉強度である。

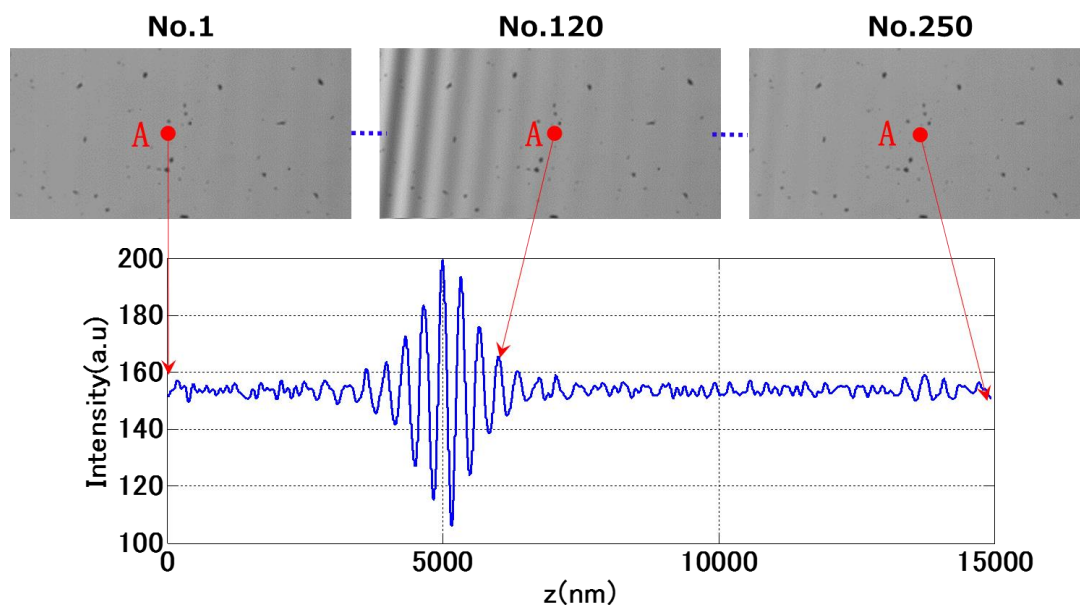


図.3.19 観測点 A のインターフェログラム

白色干渉法は、このようにして、表面のすべての点を計測して、各のインターフェログラムを解析するにより、膜厚を計測することが可能である。

ここまで、すべての実験データが得られた。

## 第四章

# 白色干渉に基づいた透明膜の厚さの解析アルゴリズム

薄膜の光学的な性質を研究して、電磁気学の発展にしたがって、開発されている。光の波動説は、その基礎となるものである。1873年、マクスウェルの電磁理論を確立してから、薄膜の光学特性解析に必要な基本理論のすべてを確立した。

白色光干渉計測は、光学的計測で非常に重要な方法であり、光ファイバセンシング技術、光ファイバーの分散計測、表面形状の非接触計測、膜厚計測、干渉位置を測るなどの方面に広く応用している。近年のコンピュータ高速化による影響を受けて、干渉縞解析を高速で、自動的に行うことができるようになった。そして、その干渉縞解析に使われるアルゴリズムはこれまでは、様々なものが提案されている。

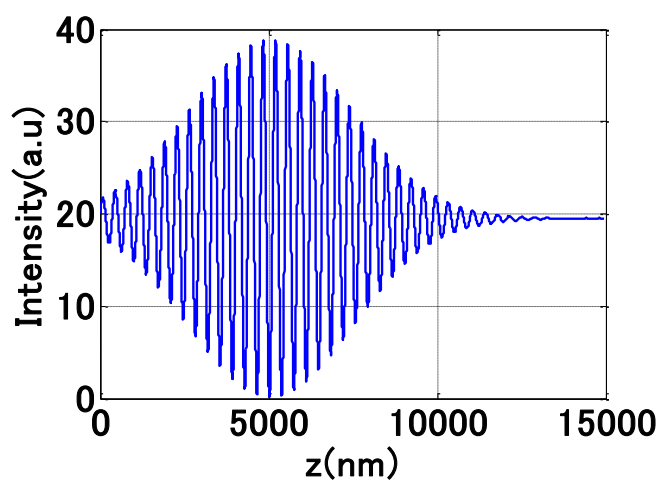
どうゼロ光路差点の位置と膜厚を測る精度を向上させるかは白色干渉法により計測する時に、いつも出会う問題である。光源のスペクトル幅と干渉計の構造が確定した場合には、干渉縞解析のアルゴリズムは直接ゼロ光路差点の位置と膜厚を測る精度を決定する。

## 4.1 白色干渉インターフェログラムと光源の関係

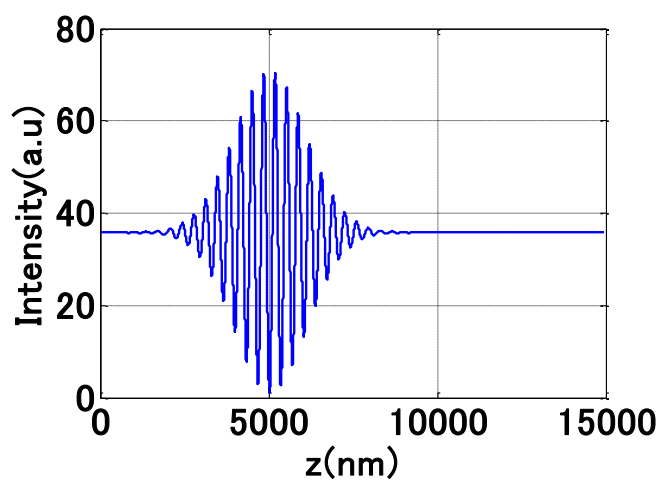
ここでは白色干渉の原理によって、シミュレーションを行う。光源スペクトルは、インターフェログラムにどのような影響を与えるかを見ていく。シミュレーションは前項で出てきた積分式を使用して行った。光源スペクトルの形や幅が、インターフェログラムにどのような影響を与えるかを調べた。

### 4.1.1 光源スペクトルの幅

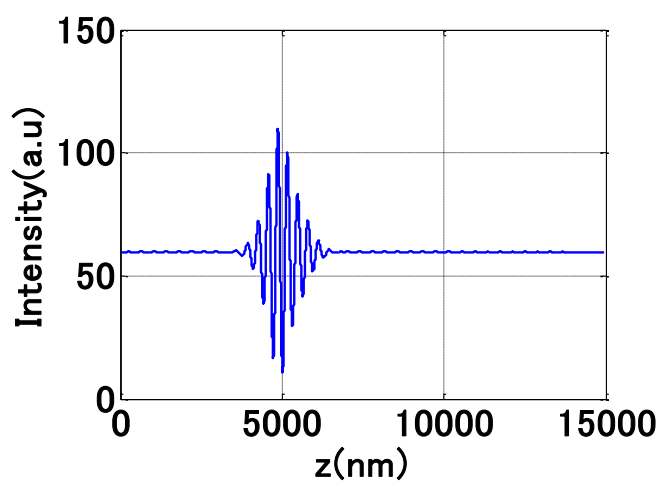
Matlab ソフトウェアを利用して、異なる光源スペクトル帯域幅で干渉光強度曲線をシミュレーションすることは可能である。図.4.1 に示すように、膜厚は 120nm に固定すると、光源スペクトル帯域幅は 100nm、200nm と 400nm を変化する場合に、インターフェログラムが与えられた。



(a) スペクトル帯域幅 100nm



(b) スペクトル帯域幅 200nm



(c) スペクトル帯域幅 400nm

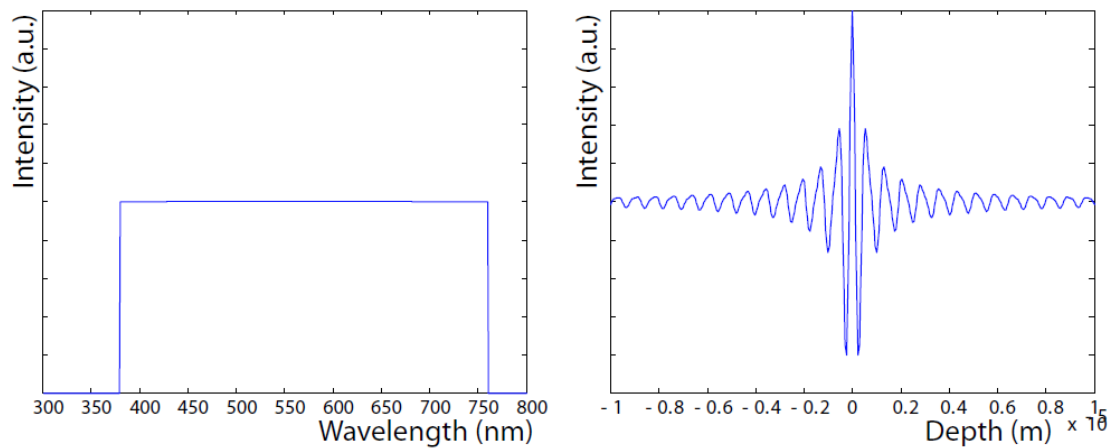
図.4.1 各スペクトル帯域のインターフェログラム

光源スペクトルの幅依存性により、スペクトル幅が広がるほど、インターフェログラムの包絡線幅は狭くなることである。

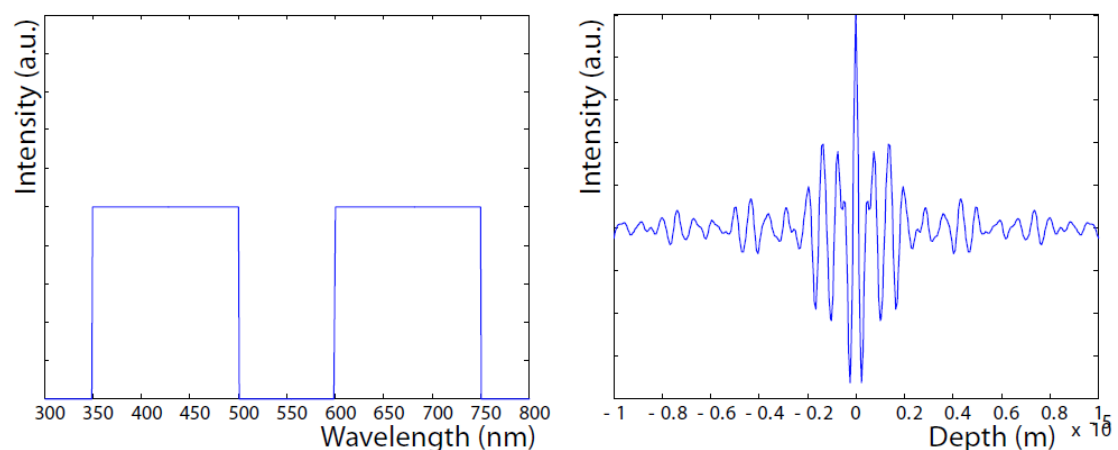
また、小林氏の論文により、物体光のスペクトルが変化した場合には、物体光のスペクトルのみ狭くなるとインターフェログラムは広くなり、その場合の中心波長が大きいほど、インターフェログラムの幅は広がることが分かった。また、反射光が弱いと干渉縞のコントラストは悪くなるため、実際の計測ではできるだけ参照光と物体光の光量が等しいことが望ましいといえる<sup>17)</sup>。

#### 4.1.2 光源スペクトルの分布

図.4.2 と図.4.3 に示すように、光源スペクトルの分布は、インターフェログラムにどのような影響を与えるかを調べた。(左図：光源スペクトルの分布、右図：インターフェログラム) <sup>17)</sup>。

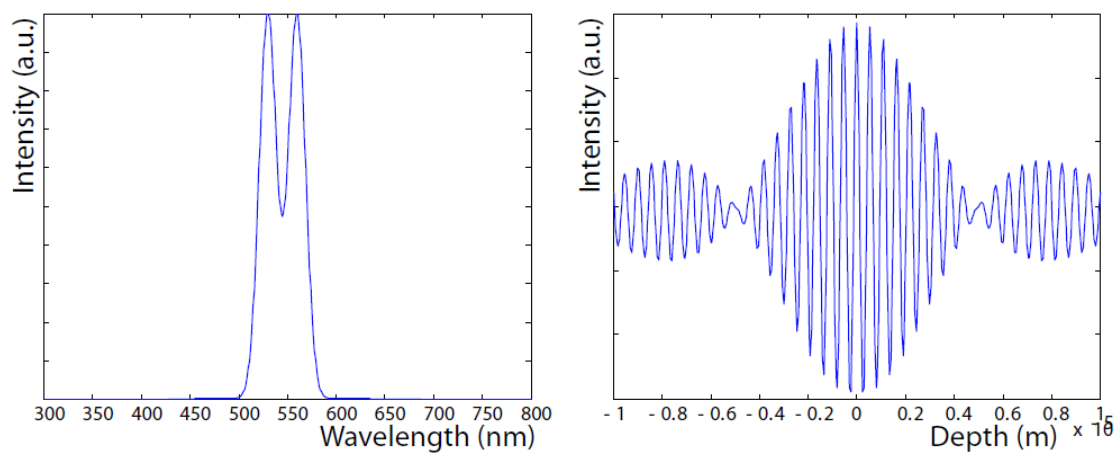


(a) 波長 380～760nm

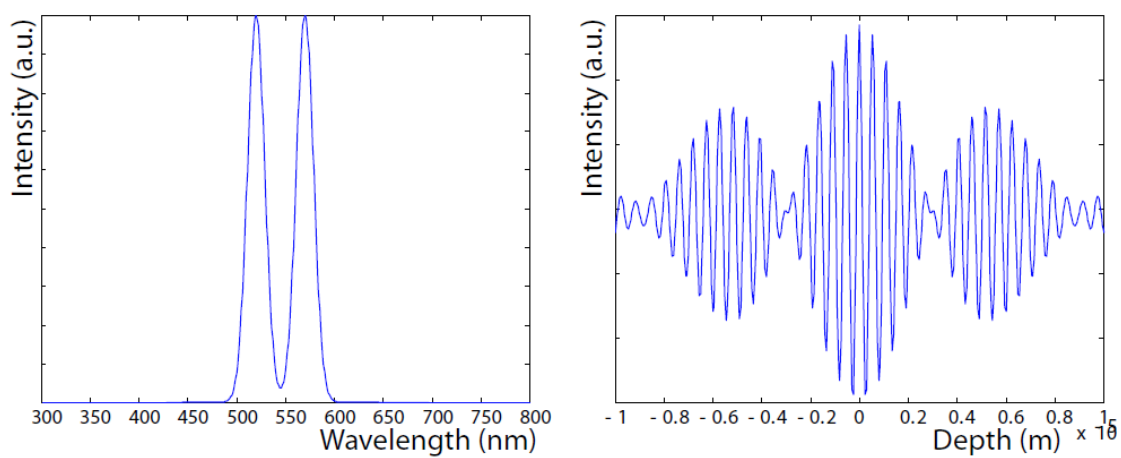


(b) 波長 350～500nm、600～750nm

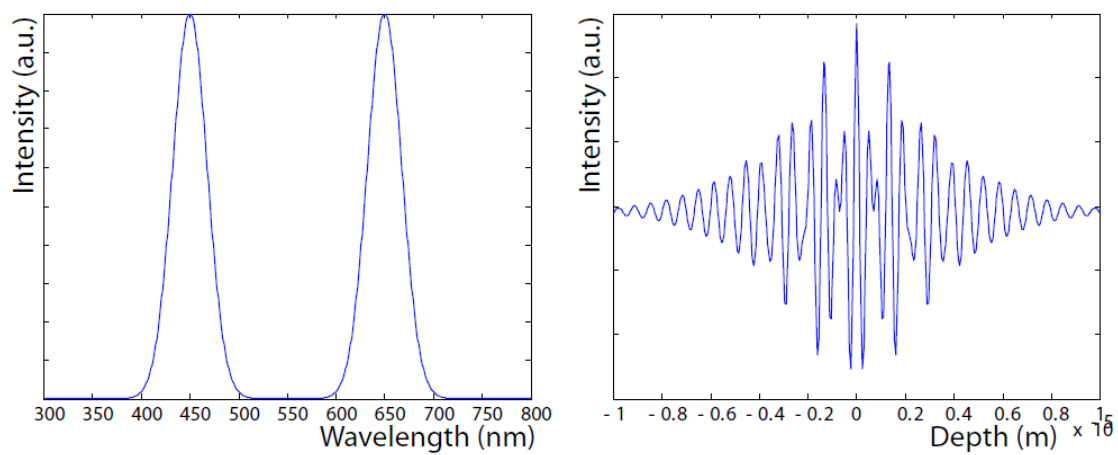
図.4.2 光源スペクトルの矩形分布とインターフェログラム



(a) ガウス分布×2



(b) ガウス分布×2



(c) ガウス分布×2

図.4.3 光源スペクトルのガウス分布とインターフェログラム

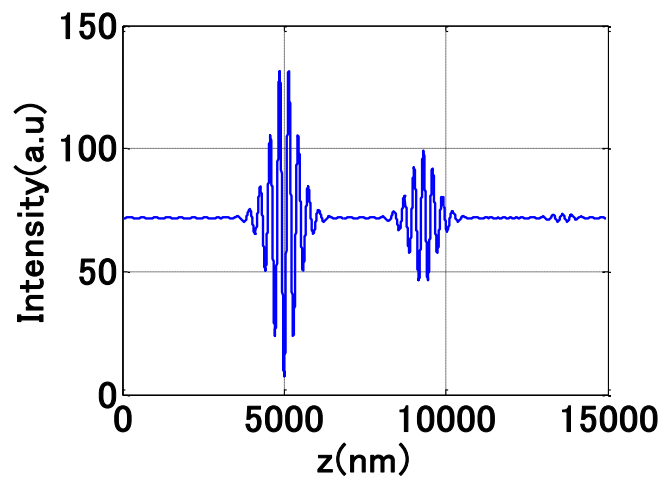
光源スペクトルの分布が異なると、インターフェログラムも異なっていることである。

## 4.2 厚膜の計測

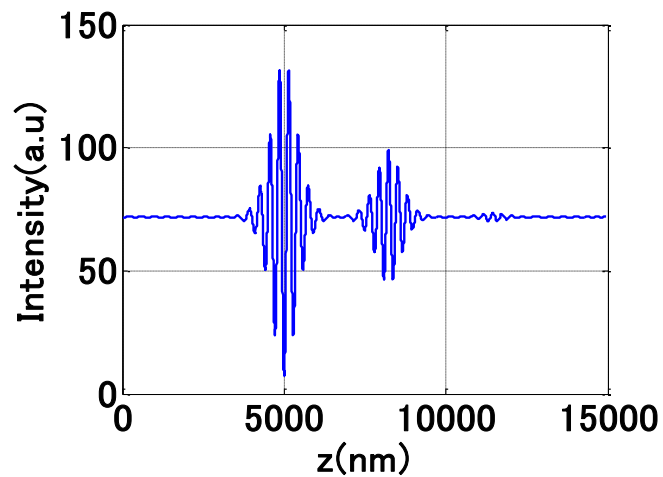
### 4.2.1 透明膜によるインターフェログラムの変化

白色光の波長範囲の中に、異なる膜厚は異なるインターフェログラムが生じられる。厚膜の場合に、サンプル膜表面ピークと裏面ピークが分離して観察できる。薄膜の場合に、上下表面に干渉縞が重なるため、同じ解析方法を使用することができない。

次には、図.4.4 に示すように、膜厚が徐々に薄くなるにしたがって、インターフェログラムも徐々に重ね合わせていった変化している。

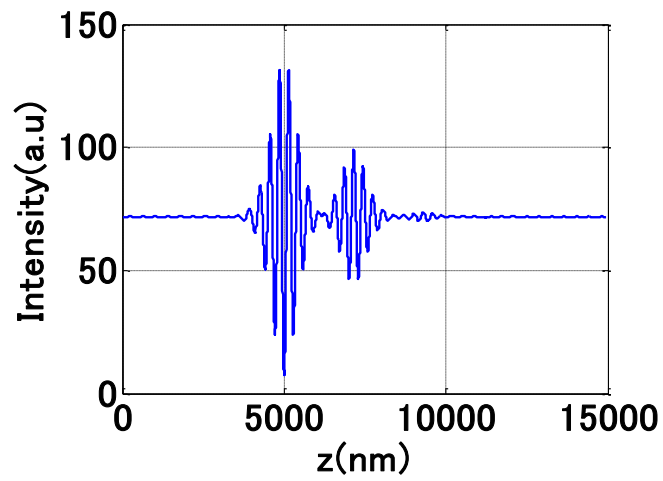


(a) 膜厚 2000nm のインターフェログラム

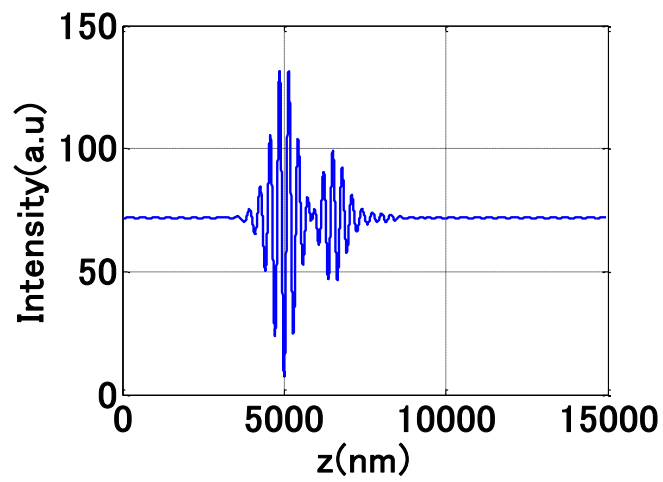


(b) 膜厚 1500nm のインターフェログラム

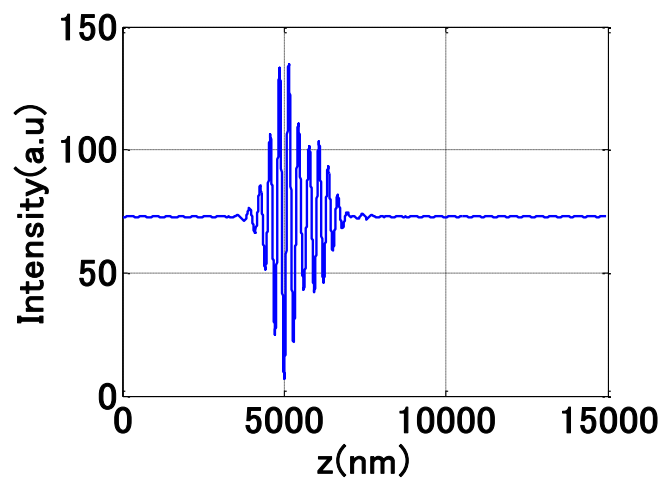




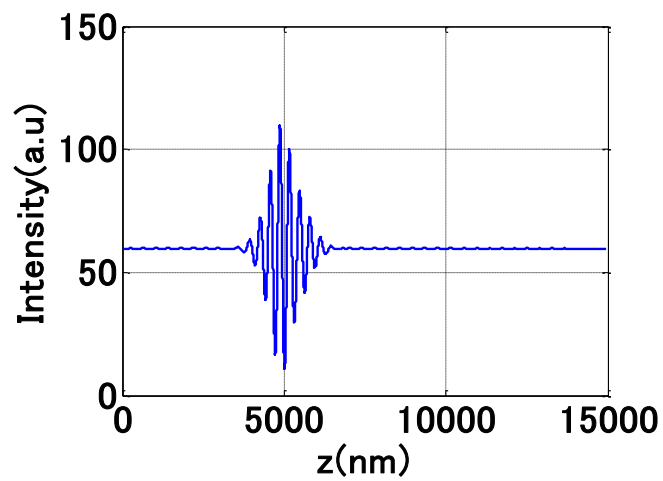
(c) 膜厚 1000nm のインターフェログラム



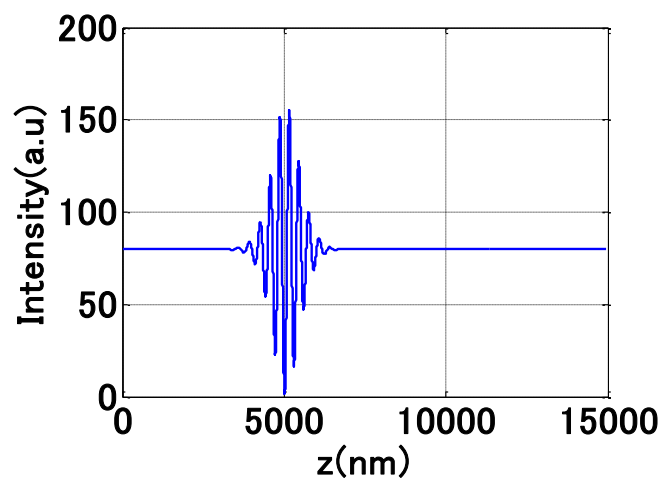
(d) 膜厚 700nm のインターフェログラム



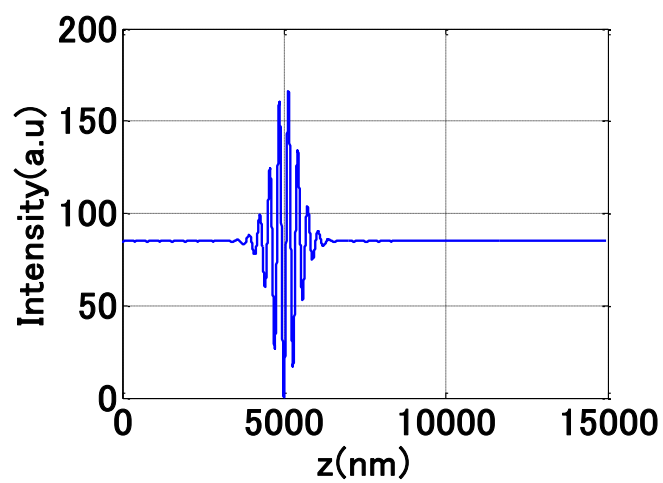
(e) 膜厚 500nm のインターフェログラム



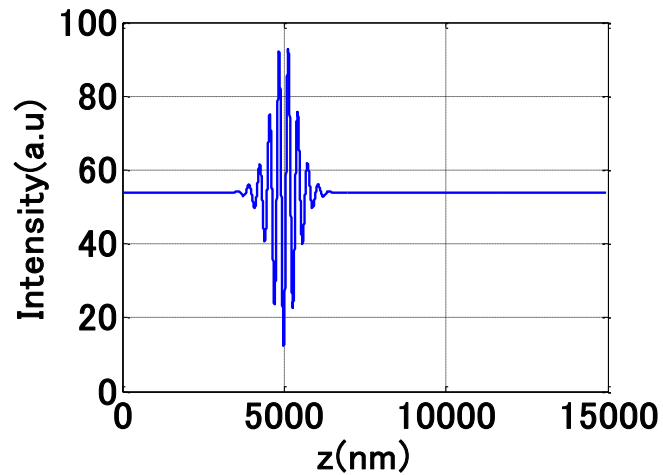
(f) 膜厚 120nm のインターフェログラム



(g) 膜厚 90nm のインターフェログラム



(h) 膜厚 50nm のインターフェログラム



(i) 膜厚 10nm のインターフェログラム

図.4.4 各膜厚のインターフェログラム

厚膜の場合（干渉縞が分離して観察できる）に干渉縞のピーク位置により、膜厚が求められる。薄膜の場合（干渉縞が重なり合う）に干渉縞の位相情報を解析するにより、膜厚が求められる。

#### 4.2.2 包絡線のピーク位置により表面形状と膜厚を求める方法

厚膜の場合に、段差がある物体の表面形状の計測とほぼ同じため、図.4.5に示すように、明らかな二つの干渉縞のピーク位置が取られる。

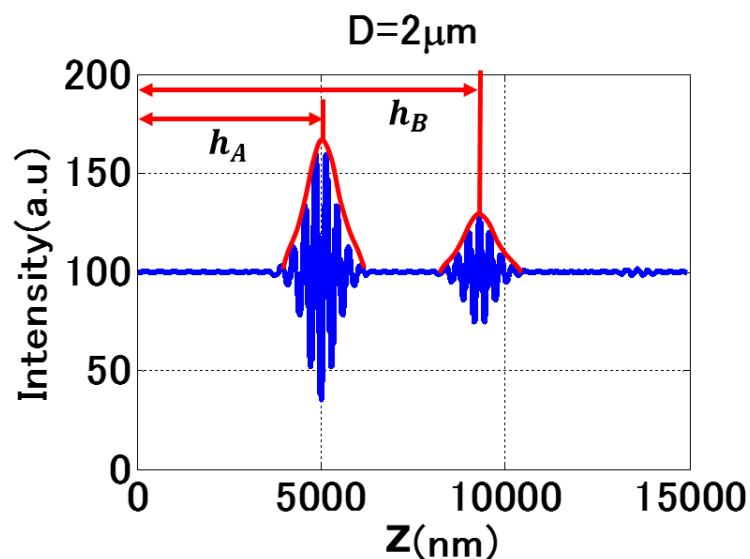


図.4.5 厚膜の計測原理

上述の干渉縞の包絡線を求める方法により、二つの干渉縞のピーク位置を求めて、膜厚を計算する

可能であり、二つのピーク位置の距離 $h_B - h_A$ により、膜厚が求められる。 $h_A$ のピーク位置により、表面形状を求めることが可能である。ここまで、上述のアルゴリズムにより、表面形状と膜厚を同時に計測した。このピーク位置を求める方法は厚膜だけ適用する。

白色干渉縞に基づいて、膜厚は約  $1\mu\text{m}$  以下の場合に、干渉縞が重なり、分離して観察されないため、上述のアルゴリズムは  $1\mu\text{m}$  以下の透明膜を計測することが適用できない。したがって、 $1\mu\text{m}$  以下の透明膜の厚さを計測するために、一般的には前述のアルゴリズムに基づいて改良するあるいは開発する新しいアルゴリズムを行う。

本研究用の透明電極 ITO 膜厚は普通の透明膜よりもっと薄くて、計算精度と計算量から考えて、FDA アルゴリズムに基づいて新しいアルゴリズムを開発し、干渉縞の位相情報を解析して、極めて薄い透明電極 ITO 膜厚を計測することである。

## 4.3 薄膜の計測

### 4.3.1 膜厚さによる位相変化

透明膜の場合には、図.4.6 のような薄膜サンプルに白色光を入射すると、膜内部の多重反射が起こる。この多重反射光は、互いの位相差に応じて強めあったり弱めあったりする。各多重反射光の位相差は、光の波長と光路長（＝薄膜内で光が往復する距離×膜の屈折率）によって決まる。このため、サンプルからの反射または透過スペクトルは、膜厚に依存した特有のスペクトルを示す。本研究の白色干渉法は、主にこのスペクトルを解析することにより膜厚を計測する方法である<sup>62,63)</sup>。

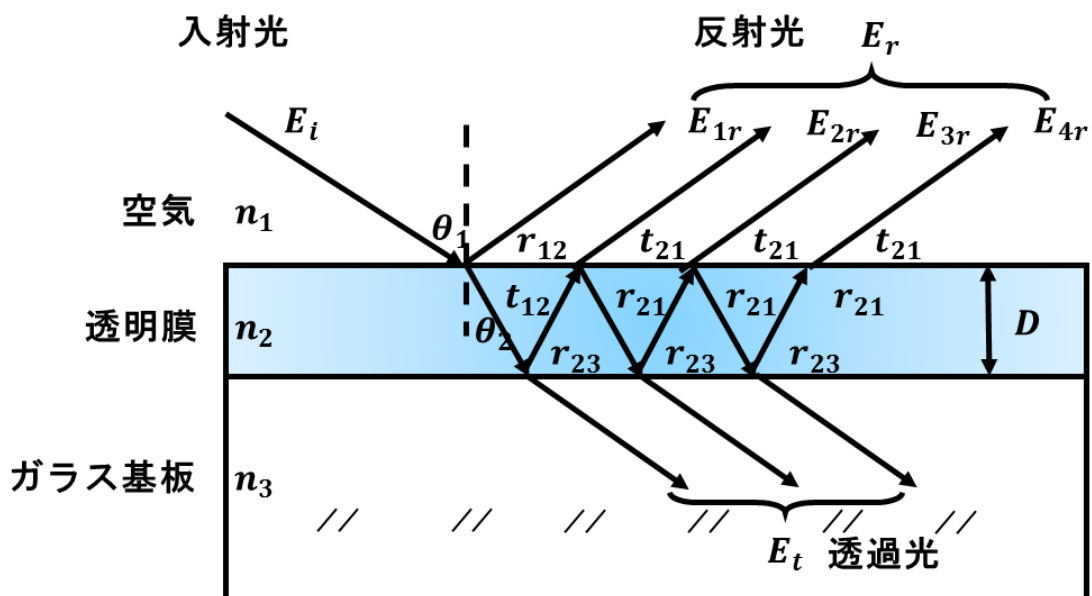


図.4.6 薄膜干渉の模式図

透明電極ITO膜を計測する場合には、透明膜の内部で多重反射の影響のため、白色干渉式は<sup>48,55)</sup>

$$I(z) = \int_{k_1}^{k_N} [I_1(k) + I_2(k) + 2\sqrt{I_1(k)I_2(k)} \cos[2k(z-h) + \phi_D(k, n_2, D)]] dk \quad (4.1)$$

のようになる。

この中で、 $n_2$ は透明電極ITO膜の屈折率であり、 $D$ は透明電極ITO膜厚である<sup>64,65</sup>。

位相の公式は

$$\phi_t(k, h, D) = 2kh + \phi_D(k, n_2, D) \quad (4.2)$$

である。

この位相 $\phi_t(k, h, D)$ は光路差 $h$ から引き起こす位相 $\phi_L(k, h) = 2kh$ と反射による位相変化 $\phi_D(k, n_2, D)$ を含んでいる<sup>48,66</sup>。

本研究では、位相 $\phi_t(k, h, D)$ を解析することにより、透明膜の厚さを求めるため、位相 $\phi_L(k, h)$ と位相 $\phi_D(k, n_2, D)$ を説明することが必要である。

第二章で、位相 $\phi_L(k, h)$ は光路差 $h$ から引き起こされることをFDA アルゴリズムの原理を用いて説明した。位相 $\phi_L(k, h)$ は $k$ に対して線形であることが分かった。

ここで、透明膜の内部の反射による位相変化 $\phi_D(k, n_2, D)$ は、各光路が透明電極ITO膜に入射して、数回、透過と反射して減衰する。図.4.6に示すように、光は空気から透明膜に入射する、空気と透明膜の振幅透過係数 $t_{12}$ と反射係数 $r_{12}$ である。透明膜とガラス基板の反射係数 $r_{23}$ である。

実験する時に、光は小さな入射角 $\theta_1$ で垂直入射に近似して、反射または透過に関わらず、各波と前の波の位相差は透明膜の内部で図.4.6に示すように多重反射している。この隣接する光線間の位相差は

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda} n_2 D \cos \theta_2 \quad (4.3)$$

である。

フレネル公式により、公式は第一面の反射係数 $r_{12}$ と透過係数 $t_{12}$ 、第二面の反射係数 $r_{23}$ と透過係数 $t_{23}$ で表す。

$$\begin{cases} r_{12} = \frac{n_1 \cos \theta_1 - n_2 \cos \theta_2}{n_1 \cos \theta_1 + n_2 \cos \theta_2} \\ t_{12} = \frac{2n_1 \cos \theta_1}{n_1 \cos \theta_1 + n_2 \cos \theta_2} \end{cases} \quad (4.4)$$

$$\begin{cases} r_{23} = \frac{n_2 \cos \theta_2 - n_3 \cos \theta_3}{n_2 \cos \theta_2 + n_3 \cos \theta_3} \\ t_{23} = \frac{2n_2 \cos \theta_2}{n_2 \cos \theta_2 + n_3 \cos \theta_3} \end{cases} \quad (4.5)$$

$$\begin{cases} r_{23} = \frac{n_2 \cos \theta_2 - n_3 \cos \theta_3}{n_2 \cos \theta_2 + n_3 \cos \theta_3} \\ t_{23} = \frac{2n_2 \cos \theta_2}{n_2 \cos \theta_2 + n_3 \cos \theta_3} \end{cases} \quad (4.6)$$

$$\begin{cases} r_{23} = \frac{n_2 \cos \theta_2 - n_3 \cos \theta_3}{n_2 \cos \theta_2 + n_3 \cos \theta_3} \\ t_{23} = \frac{2n_2 \cos \theta_2}{n_2 \cos \theta_2 + n_3 \cos \theta_3} \end{cases} \quad (4.7)$$

次に、透明膜から空気の振幅透過係数 $t_{21}$ と反射係数 $r_{21}$ はフレネル公式により、 $t_{21} = (n_2/n_1)t_{12}$ と $r_{21} = -r_{12}$ である<sup>42</sup>。

$r_{23}$ と $t_{23}$ の式はこのように導き出す。 $r_{12}$ 、 $t_{12}$ 、 $r_{23}$ 、 $t_{23}$ を用いて、反射係数 $r$ と透過係数 $t$ の公式は

$$\begin{cases} r = \frac{r_{12} + r_{23}e^{2i\beta}}{1 + r_{12}r_{23}e^{2i\beta}} \\ t = \frac{t_{12}t_{23}e^{i\beta}}{1 + r_{12}r_{23}e^{2i\beta}} \end{cases} \quad (4.8)$$

$$\begin{cases} r = \frac{r_{12} + r_{23}e^{2i\beta}}{1 + r_{12}r_{23}e^{2i\beta}} \\ t = \frac{t_{12}t_{23}e^{i\beta}}{1 + r_{12}r_{23}e^{2i\beta}} \end{cases} \quad (4.9)$$

ようになる。

ここから反射率 $R$ と透過率 $T$ を得る<sup>42)</sup>。

$$R = |r|^2 = \frac{r_{12}^2 + r_{23}^2 + 2r_{12}r_{23} \cos 2\beta}{1 + r_{12}^2 r_{23}^2 + 2r_{12}r_{23} \cos 2\beta} \quad (4.10)$$

$$T = |t|^2 = \frac{n_3 \cos \theta_3}{n_1 \cos \theta_1} \frac{t_{12}^2 t_{23}^2}{1 + r_{12}^2 r_{23}^2 + 2r_{12}r_{23} \cos 2\beta} \quad (4.11)$$

光が空気から透明膜に入射する反射係数 $r$ は複素数のため、式 4.8 はこのように簡略化できる。

$$r(k, n_2, D) = |r| e^{i\phi_D(k, n_2, D)} \quad (4.12)$$

透明膜内部の位相変化 $\phi_r$ と $\phi_t$ は式 4.8 と 4.9 から易く計算でき、得られた結果は<sup>43,67,68)</sup>

$$\tan \phi_r = \tan(\arg(r)) = \frac{r_{23} (1 - r_{12}^2) \sin 2\beta}{r_{12} (1 + r_{23}^2) + r_{23} (1 + r_{12}^2) \cos 2\beta} \quad (4.13)$$

$$\tan \phi_t = \tan(\arg(t)) = \frac{1 - r_{12} r_{23}}{1 + r_{12} r_{23}} \tan \beta \quad (4.14)$$

である。

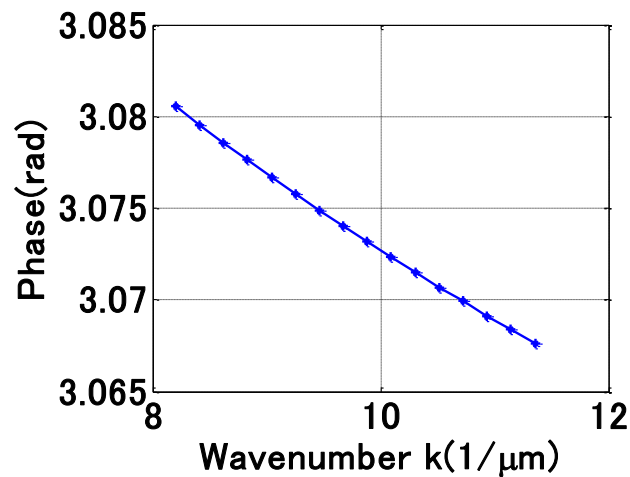
ここまで、本研究では、主に透明膜の内部の理論的な反射による位相変化 $\phi_D(k, n_2, D)$ が求められた。

$$\phi_D(k, n_2, D) = \phi_r \quad (4.15)$$

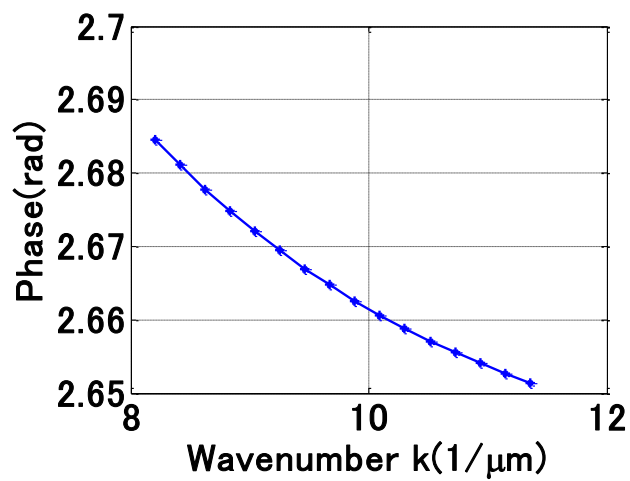
透明電極 ITO 膜は屈折率分散を考慮しない時 2.15 とした。一方、波長が 550 から 780nm までにおいて、空気の屈折率は 1、ガラス基板の屈折率は 1.5 である。はじめに垂直入射を仮定して位相変化 $\phi_d(k)$ のモデルを構築してみる。膜厚の変化にしたがって、位相変化 $\phi_d(k)$ は変化する。

本文では、 $D$ は実際の膜厚であり、 $d$ はシミュレーションの膜厚である。

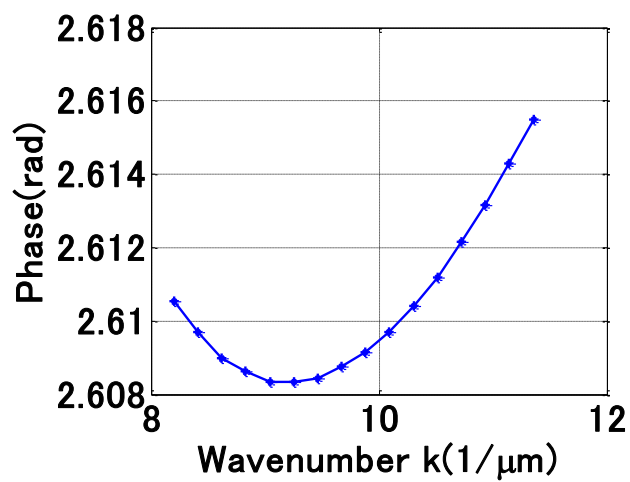
異なる膜厚 $d$ に対応する一連の理論的な反射による位相変化 $\phi_d(k)$ は図.4.7 ように変化している。これは、Matlab ソフトウェアにより計算した。



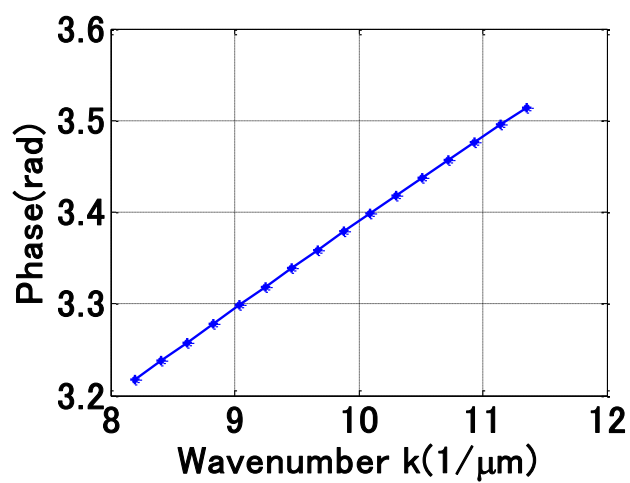
(a) 膜厚 $d=1\text{nm}$



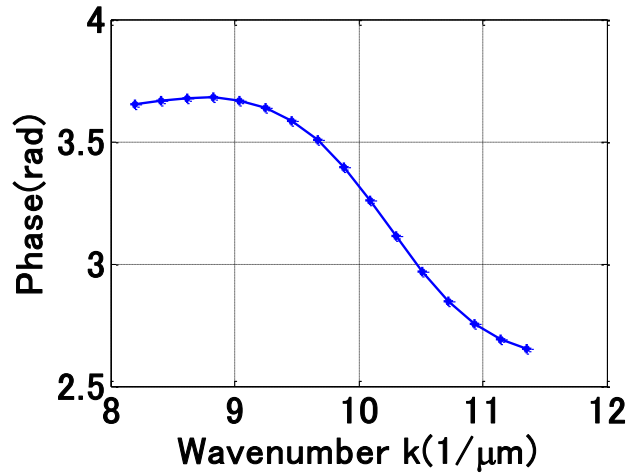
(b) 膜厚 $d=10\text{nm}$



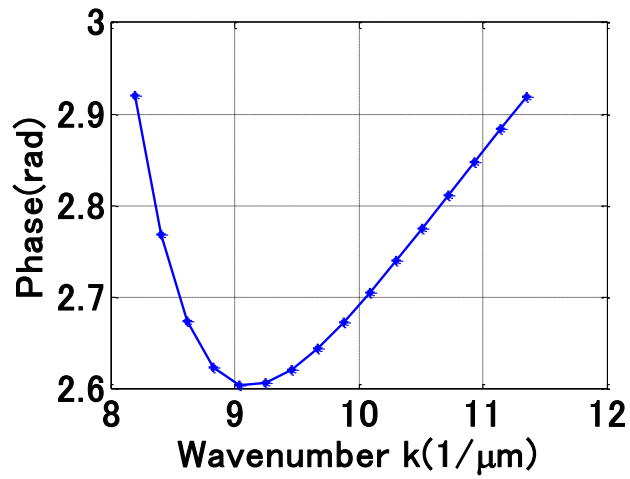
(c) 膜厚 $d=15\text{nm}$



(d) 膜厚 $d=80\text{nm}$



(d) 膜厚 $d=120\text{nm}$



(d) 膜厚 $d=150\text{nm}$

図.4.7 理論的な反射による位相変化 $\phi_d(k)$ のモデル

図.4.7 の横軸は波長であり、縦軸は位相変化 $\phi_d(k)$ である。

ここまで、光路差 $h$ から引き起こす位相 $\phi_L(k, h)$ と反射による位相変化 $\phi_D(k, n_2, D)$ を説明した。

#### 4.3.2 レーベンバーグ・マーカート法 (LM 法) による膜厚の解析

薄膜の場合に、干渉縞が重なるため、分離して観察できない。そのため、従来の白色干渉法では 50nm までを計測する可能であった。



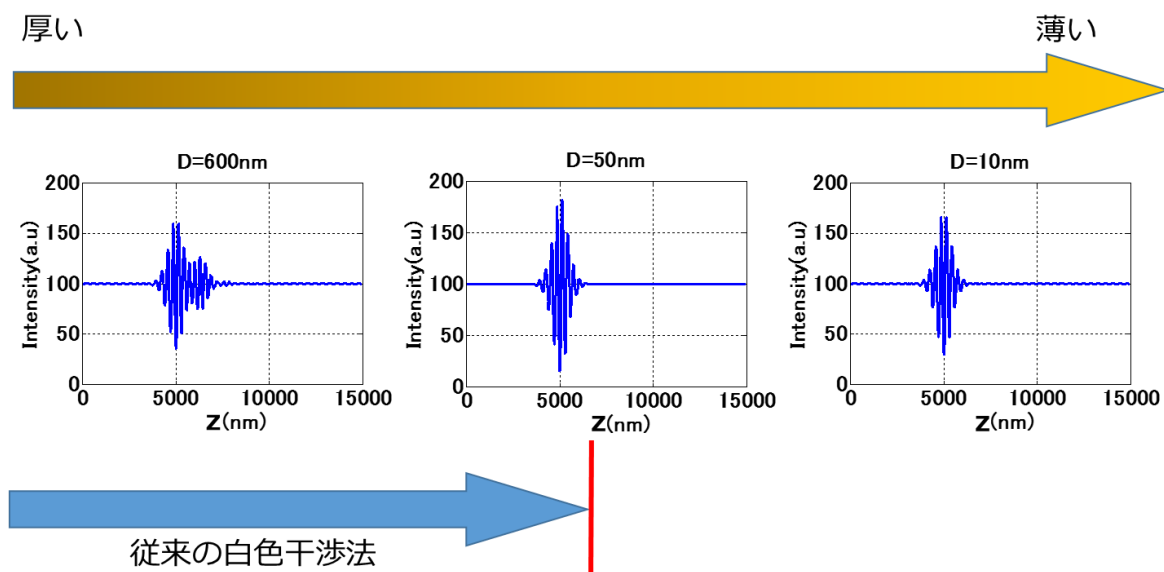


図.4.8 従来の白色干渉法の計測範囲

1 $\mu\text{m}$  以下の透明膜の厚さを計測するため、Seung-Woo Kim と Gee-Hong Kim は FDA アルゴリズムに基づいて、Levenberg-Marquardt 非線形最適化手法（レーベンバーク・マーカート法、LM 法）を提出した<sup>63)</sup>。この LM 法により、サンプルに対して分析を行った結果、図.4.8 に示すように、50nm までの透明膜の厚さが計測できた。

ここでは、従来の白色干渉法の LM 法を詳しく説明する。

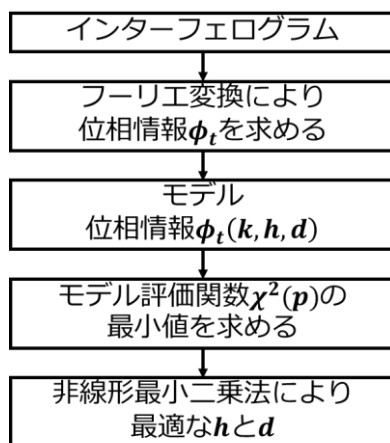


図.4.9 LM 法で計測過程

図.4.9 に示すように、白色インターフェログラムをフーリエ変換して、得られた位相 $\phi_t$ は、光路差 $h$ と膜厚 $D$ の関数になる。LM 法は、位相 $\phi_t(k, h, D)$ のモデルをたて、評価関数の最小値を求める。非線形最小二乗法により、最適な $h$ と $D$ を探す方法である。

LM 法の最適値を探す方法は、非線形の評価関数の自乗の和の形で表された関数の極小値を求める反復法の一つであり、最急降下法とニュートン法を組み合わせた方法である。この組合は非線形最小二乗

問題（非線形な関数の二乗和の最小値を求める問題）を解く標準的な方法になっている。現在の解が正解から遠い場合は、遅いが収束することが保証されている最急降下法と同じように動作し、他方、正解から近い場合はニュートン法を実行するものである。

LM法の最適な $h$ と $D$ を探す過程を説明するため、基本的な最急降下法とニュートン法を以下で説明する。

## 1、最急降下法

最急降下法は、関数ポテンシャル面の傾き（一階微分）のみから、関数の最小値を探索する連続最適化問題の勾配法のアプローチである。勾配法としては最も簡単であり、このアプローチが直接、間接に使用される場合が多い。

最急降下法は、最適化したい関数の一階導関数を見て、より最適な点へ更新していき、最終的に最もよい点に収束させる手法である。つまり、最急降下法とは関数の最小値（あるいは最大値）を求める手法であり、単純で計算量が少ないのでよく使われる方法である。

変数 $x$ が $t$ の関数であり、 $x = x(t)$ とする。この時に目的関数 $f(x)$ を $t$ について微分する。

$$\frac{d}{dt}f(x(t)) = \frac{\partial f(x)}{\partial x} \frac{dx}{dt} \quad (4.16)$$

ここで、 $\alpha$ を正の定数として、 $x(t)$ が

$$\frac{dx}{dt} = -\alpha \frac{\partial f(x)}{\partial x} \quad (4.17)$$

を満たすものとする、

$$\frac{d}{dt}f(x(t)) = -\alpha \left(\frac{\partial f(x)}{\partial x}\right)^2 \quad (4.18)$$

微分係数は常に負となる。従って、関数 $f(x)$ は $t$ に関して減少関数となる。

最急降下法はこのような関数 $x(t)$ を数値解析的に求めて、 $t$ を無限大とすることに対応しているわけである<sup>69,70</sup>。

最急降下法の特徴は以下のようなになる。

1. 傾き（一階微分）のみしか見ないので、手法として簡便で計算も速い。
2. 大域的な収束性があるが、一次収束のため、収束がそれほど速くない。
3. 勾配法のため、局所的な最小値にハマりやすく、大域的な最小値を求めるのは困難であることが欠点である。この欠点を避けるために、複数の初期値から探索を行うなどの対策が必要である。この対策をした手法として確率的勾配降下法がある。
4. 関数の偏微分が計算できなくてはならない。

このように最急降下法のアプローチは単純で、実装もしやすいという点で、広く応用されている。しかしながら、単純なので、いくつか問題点がある。

関数の形によっては、与えられた初期値によって収束先が変わってしまう。特に、非線形になればなるほど関数形は複雑になるので、この問題は顕著になる。実際には、収束した時にその収束値が最適化かどうかを判断するようなアプローチが用いられていたり、初期値または最適値として妥当な値を何

らかの方法で予め算出していたりすることがある。

最急降下法の収束速度はそこまで速くないので、データ規模が大きくなればなるほど、処理に時間がかかってしまう。収束速度は更新率に依存して、更新率が小さければ小さいほどきれいに収束しやすいが、単純に時間がかかる。

最急降下法には簡単であり、各ステップの計算量が少ない、関数が唯一の極小点を持つ時には大域的な収束性が保証されるという利点がある一方で、解の収束が極めて遅いという欠点がある。また、関数に複数の極小点がある時には、求められるのはいくつかの極小点のうちのいずれかであり、それが最小点であるという保証はない。

## 2、ニュートン法

最急降下法は簡単な計算で構成された実行しやすいアルゴリズムであり、大域的収束を持っている利点がある。しかし、最適解への速度（収束の速度）が遅くなる現象がある。従って、ニュートン法は、関数の二次微分を利用して収束の高速化をすることである。そして、数値解析の分野において、ニュートン法またはニュートン・ラフソン法（Newton-Raphson method）は、数値計算によって方程式系を解くための反復法による求根アルゴリズムの一つである。

ニュートン法とは、 $f(x) = 0$ になるような $x$ を求めるアルゴリズムの一つで、この方程式の解が近似的に求められる方法である。対象とする方程式系に対する条件は、領域における微分可能性と二次微分に関する符号だけであり、線型性などは特に要求しない。収束の速度も二次収束なので、古くから数値計算で使用されていた<sup>69,70)</sup>。

点 $(x_i, f(x_i))$ を通り、傾きが $f'(x_i)$ の直線の方程式は

$$y - f(x_i) = f'(x_i)(x - x_i) \quad (4.19)$$

である。 $y = 0$ の時に、 $x$ の値が $x_{i+1}$ になることが分かる。したがって、 $x_{i+1}$ は

$$x_{i+1} = x_i - \frac{f(x_i)}{f'(x_i)} \quad (4.20)$$

となる。これで、 $x_i$ から $x_{i+1}$ が計算できる。

これをニュートン法の漸化式と言う。この漸化式を用いれば、次々とより精度の良い近似解が求められる。

計算の終了は

$$\left| \frac{x_{i+1}}{x_i} - 1 \right| \leq \varepsilon \quad (4.21)$$

の条件を満たした場合とするのが一般的である。 $\varepsilon$ は計算精度を決める定数で、非常に小さな値を設定する。

目的関数 $f(x)$ は点 $x_i$ の周りにテイラー展開すると

$$f(x_i + d) \approx f(x_i) + \nabla f(x_i)^T d + \frac{1}{2} d^T \nabla^2 f(x_i) d \quad (4.22)$$

と二次関数によって近似できる。この二次関数式を最適化しようとするのがニュートン法である。

関数と計算を中止する条件はプログラム中に書くものとする。図.4.10のようなニュートン法のフローチャートが考えられる。なお、漸化式を取扱う場合、一次元配列を利用すると便利である。

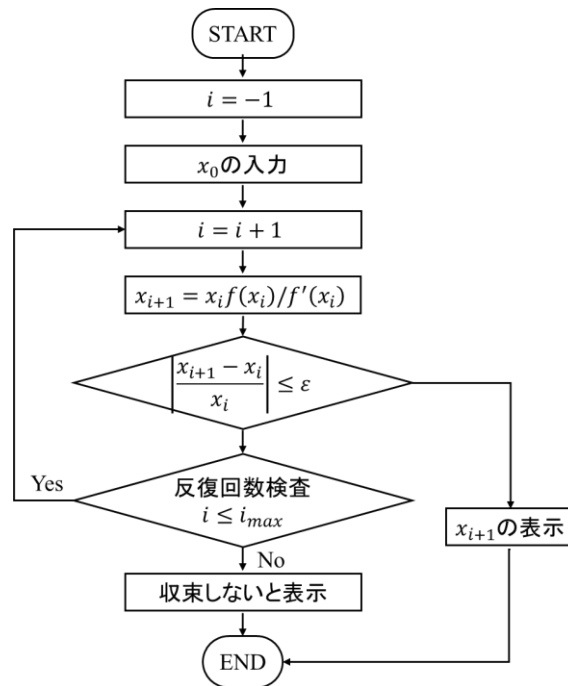


図.4.10 ニュートン法のフローチャート

ニュートン法の特徴：

1. 二次収束：収束が速い
2. 大域的な収束性を持たない。但し、局所的な収束性は良い。

ニュートン法により、近似値を求めようとする場合には、ヤコビ行列が明示的に知られていなければ計算できない。しかし、関数によってはヤコビ行列が明示的に知らない場合もある。この場合にはヤコビ行列を必要としない準ニュートン法を用いる<sup>67,68)</sup>。

ここで、ヘッセ行列 $\nabla^2 f(\mathbf{x}_k)$ を適当な正定値対称行列で近似するのは、準ニュートン法である。

準ニュートン法の特徴：

1. 目的関数が凸関数の場合は、大域的な収束性を持ち超一次収束で収束が結構速い。
2. 目的関数が非凸関数の場合も、大域的な収束性を持つように工夫でき、実際多くの場合に超一次収束が期待できる。

### 3、レーベンバーグ・マーカート法

レーベンバーグ・マーカート法は、非線形関数の二乗和が最小にするものを求める方法として使われ、LM 法と呼ばれている。これを使えば、誤差の二乗和が最小となるという点で、関数フィッティングが行える。

従って、関数の最小値を求めたいので、微分をして値が減る方向に進んでいくというのが最急降下法である。この方法は関数の形が何であっても、確実に値が減じられるが、速度が遅い。微分がゼロになる場所を見つけるために、関数を二階微分してそれがゼロになる位置を探す。この二階微分は一階微分の二乗で近似できるのがニュートン法である。この方法は二階微分を使うだけに最急降下法よりも、高

速に停留点を探せる。しかし、ここが関数の最小値とは限らないという問題がある。この点に対する改良の一つのアプローチが LM 法である<sup>69,70)</sup>。

簡単に言うと、LM 法は最急降下法とニュートン法を組み合わせた方法である。ニュートン法がうまくいかない時に、最急降下法でゆっくりとでも確実に値を減じて、解が近そうだなとなったら、ニュートン法で一気にゼロになる場所に突撃する。

LM 法の要旨は

1. 関数の微分の微分が零になる場所を探す方法
2. 二階微分を一階微分の二乗で近似する（ニュートン法）
3. 安定性の向上の工夫を入れる（LM 法）

というものである。

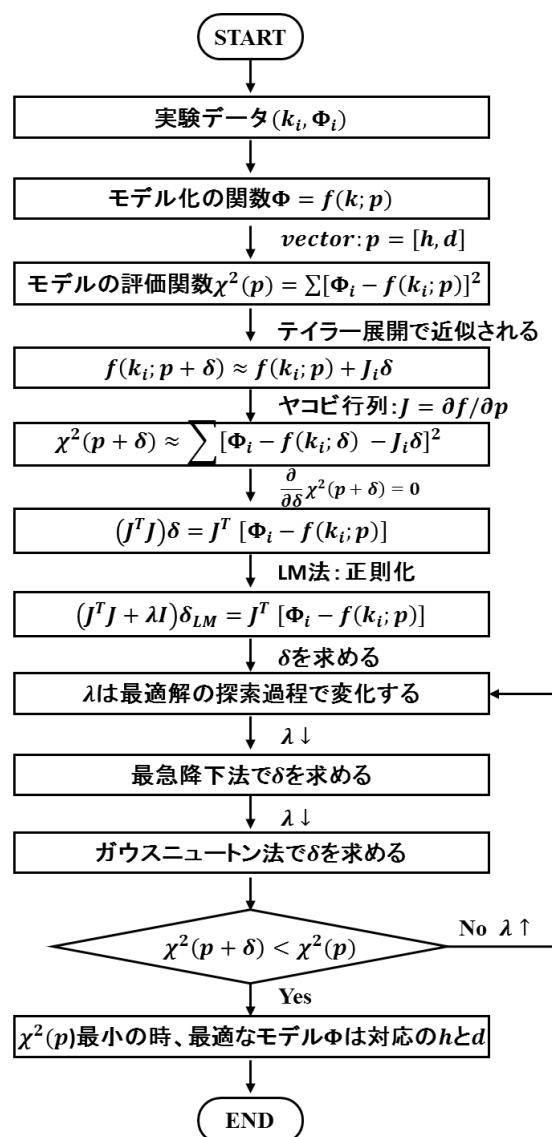


図.4.11 モデル評価関数の理論計算のフローチャート

図.4.11 のようなモデル評価関数の理論計算のフローチャートである。実験データは $(k_i, \Phi_i)$ であり、モ

デル化の関数は $\Phi = f(k; p)$ である。そして、このモデルの評価関数は式 4.15 のようになった。

$$\chi^2(p) = \sum [\Phi_i - f(k_i; p)]^2 \quad (4.23)$$

式 4.23 最小二乗評価関数は展開すると

$$\begin{aligned} \chi^2(p) &= \sum [\Phi_i - f(k_i; p)]^2 \\ &= (\Phi - f)^T (\Phi - f) \\ &= (\Phi^T - f^T) (\Phi - f) \\ &= \Phi^T \Phi - 2\Phi^T f + f^T f \end{aligned} \quad (4.24)$$

になった。

そして、モデルの評価関数の勾配は

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial p} \chi^2(p) &= \frac{\partial}{\partial p} [(\Phi - f)^T (\Phi - f)] \\ &= (\Phi - f)^T \frac{\partial}{\partial p} (\Phi - f) + (\Phi - f)^T \frac{\partial}{\partial p} (\Phi - f) \\ &= 2(\Phi - f)^T \frac{\partial}{\partial p} (\Phi - f) \\ &= -2(\Phi - f)^T \frac{\partial f}{\partial p} \\ &= -2(\Phi - f)^T J \end{aligned} \quad (4.25)$$

であり、この中で、 $J = \frac{\partial f}{\partial p}$ はヤコビ行列である。

モデルの評価関数は、局所的に近似されるため、一次テイラー級数展開により

$$f(k; p + \delta) \approx f(k; p) + J\delta \quad (4.26)$$

この式 4.26 は式 4.23 に代入して、

$$\begin{aligned} \chi^2(p + \delta) &= \sum [k_i - f(k_i; p) - J_i \delta]^2 \\ &= (\Phi - f - J\delta)^T (\Phi - f - J\delta) \\ &= [(\Phi - f)^T - (J\delta)^T][(\Phi - f) - (J\delta)] \\ &= (\Phi - f)^T (\Phi - f) - (\Phi - f)^T J\delta - (J\delta)^T (\Phi - f) + (J\delta)^T J\delta \\ &= \Phi^T \Phi + f^T f - 2\Phi^T f - 2(\Phi - f)(J\delta)^T + \delta^T J^T J\delta \end{aligned} \quad (4.27)$$

式 4.27 により、ここで、 $\chi^2$ の微小移動は $\delta$ であり、ヤコビ行列の最小二乗基準は約 $J^T J$ である。

$\frac{\partial \chi^2}{\partial \delta} = 0$ の時に、 $\chi^2(p + \delta)$ の最小値がある。つまり、

$$\frac{\partial}{\partial \delta} \chi^2(p + \delta) \approx -2(y - f)^T J + 2\delta^T J^T J = 0 \quad (4.28)$$

式 4.28 により、ガウス・ニュートン法により、正規方程式は

$$\begin{aligned} 2\delta^T J^T J &= 2(\Phi - f)^T J \\ (J\delta)^T &= (\Phi - f)^T \\ J\delta &= \Phi - f \\ (J^T J)\delta &= J^T (\Phi - f) \end{aligned} \quad (4.29)$$

になった。つまり、式 4.30 のように書ける。

$$(J^T J)\delta = J^T [\Phi_i - f(k_i; p)] \quad (4.30)$$

LM 法は、最急降下法とガウス・ニュートン法により、パラメータを適応的に変化させた。

$$(J^T J + \lambda I)\delta_{LM} = J^T [\Phi_i - f(k_i; p)] \quad (4.31)$$

ここで、 $\lambda$ の値が大きい場合に最急降下法で計算し、 $\lambda$ の値が小さい場合にニュートン法で計算する。現在の解が正解から遠い場合は遅いが収束することが保証されている最急降下法と同じように動作し、正解から近い場合はニュートン法を実行する。 $\lambda$ は最急降下方向に小さなステップで小さくなるため、初期化の $\lambda$ 値は大きくなるように仮定する。

もし式 4.32 の条件が満たされていれば

$$\chi^2(p + \delta) > \chi^2(p) \quad (4.32)$$

$\lambda$ は大きくなって、収束が十分でないと判定される。 $\chi^2(p + \delta) < \chi^2(p)$ の時に、 $\chi^2(p)$ が極小値となる。

$\chi^2(p)$ は最小の時に、最適なモデル $\Phi$ は対応の $h$ と $D$ は計測したい走査高度と透明膜の厚さである。

LM 法で最初の推定値によって異なる結果が出た。そして、求められるのはあくまで極小値なので、得られる値が真の最小値ではない可能性がある<sup>69)</sup>。

### 4.3.3 LM 法の限界

Seung-Woo Kim と Gee-Hong Kim の論文に提出した以上の LM 法により透明膜の厚さを計測する。

本節では、LM 法の限界を説明する<sup>60)</sup>。

1. 位相 $\phi_t(k, h, D)$ のモデルをたてる時に、同時に光路差 $h$ と膜厚 $D$ の最適値を探索するには、多くの極小値が存在することがわかっている。
2. 膜厚 $D$ が薄いほど、膜厚 $D$ を横軸とした時に極小値の密度が高い。これらの値で良い初期推測を行い、早く大域的な極小値に到達する必要がある。
3. LM 法により、光路差 $h$ と膜厚 $D$ を同時に考慮すると計算量は十分大きい。
4. 図.4.12 に示すように、LM 法で、50nm 以下の膜厚の計測が保障できない。

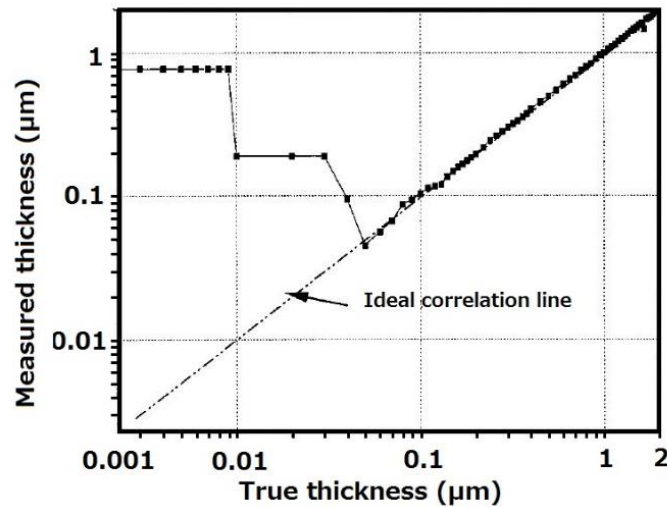


図.4.12 LM 法で膜厚の計測結果

図.4.12に示すように、膜厚が50nm以下で、正確な値が得られなかった理由を分析すると、本研究の方法と比較して、LM法の限界が分かる<sup>60)</sup>。

図.4.13 に示すような LM 法のフローチャートにより、LM 法で、透明電極 ITO 膜厚を計測して、この計測が保障できない原因を説明する。

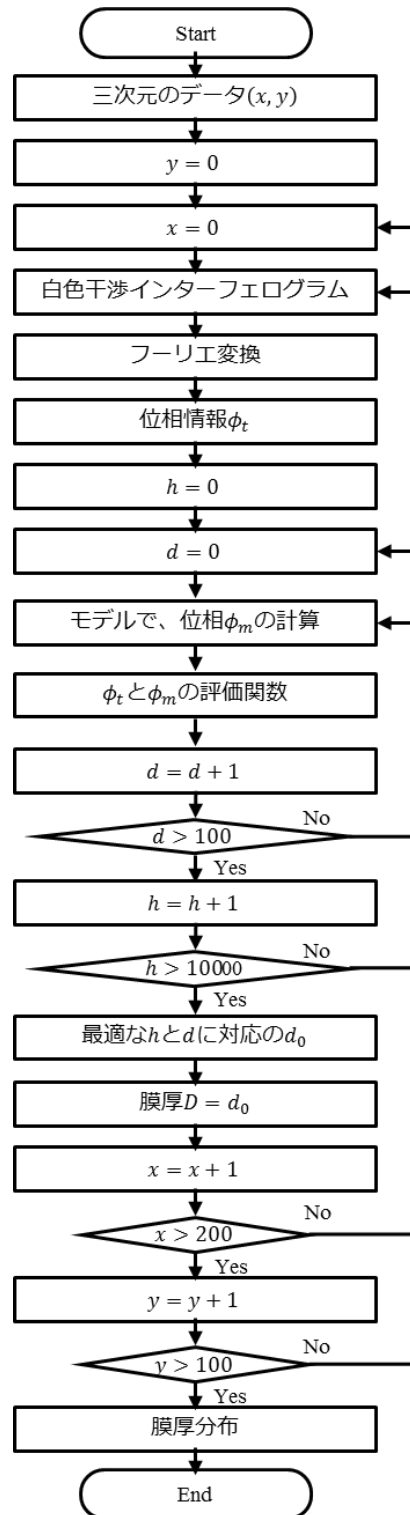


図.4.13 LM 法のフローチャート



LM法では、光路差 $h$ と膜厚 $D$ の最初の推測値に大きく依存している、膜厚 $D$ が50nm以上の場合には、唯一の極小値が存在するため、膜厚を正確に計測することが可能である。膜厚 $D$ が50nm以下の場合には、波数によらず、膜内部の反射による位相変化 $\phi_D(k, n_2, D)$ が0又は $\pi$ になり、正弦非線形変化のため、膜厚 $D$ の影響が極めて小さく、無視できるレベルに達する。したがって、LM法で大量の光路差 $h$ と膜厚 $D$ の最適値を探索する時に、50nm以下の膜厚の極小値は密集している。9nmの透明電極ITO膜を計測する時に、唯一の極小値がないため、計測が保障できない。

LM法により、透明電極ITO膜厚を計測する場合に、同時に光路差 $h$ と膜厚 $D$ の最適値を探索すると、膨大な計算が必要であるため、多くの計測時間がかかった。

本研究では、上述のLM法の限界により、極めて薄い透明電極ITO膜厚（50nm以下）を高速に計測するために、新しいアルゴリズムの開発は必要である。極めて薄い透明電極ITO膜厚を計測する場合に、白色干渉計の膜厚計測装置では、高速フーリエ変換（FFT）してから、位相 $\phi_L(k, h)$ と位相 $\phi_D(k, n_2, D)$ が得られ、主に位相 $\phi_D(k, n_2, D)$ を分析することにより、膜厚が求められる。次章に詳しく説明する。

## 第五章

# 白色干渉による極めて薄い透明膜の厚さを計測するアルゴリズム（CM法）の開発

従来の LM 法で、50nm までの透明膜の厚さを計測することが可能である。本研究の目的は白色干渉に基づいて、新しいアルゴリズムを開発して、図.5.1 に示すように、高速に数 nm から、1 $\mu$ m の膜厚までの計測範囲の拡大を実現することである。

本研究では、主に 50nm 以下の透明電極 ITO 膜を計測するため、新しいアルゴリズムの開発と改良を行った。白色インターフェログラムをフーリエ変換してから、得られた振幅情報と位相情報を解析して、極めて薄い透明電極 ITO 膜厚を計測することである。

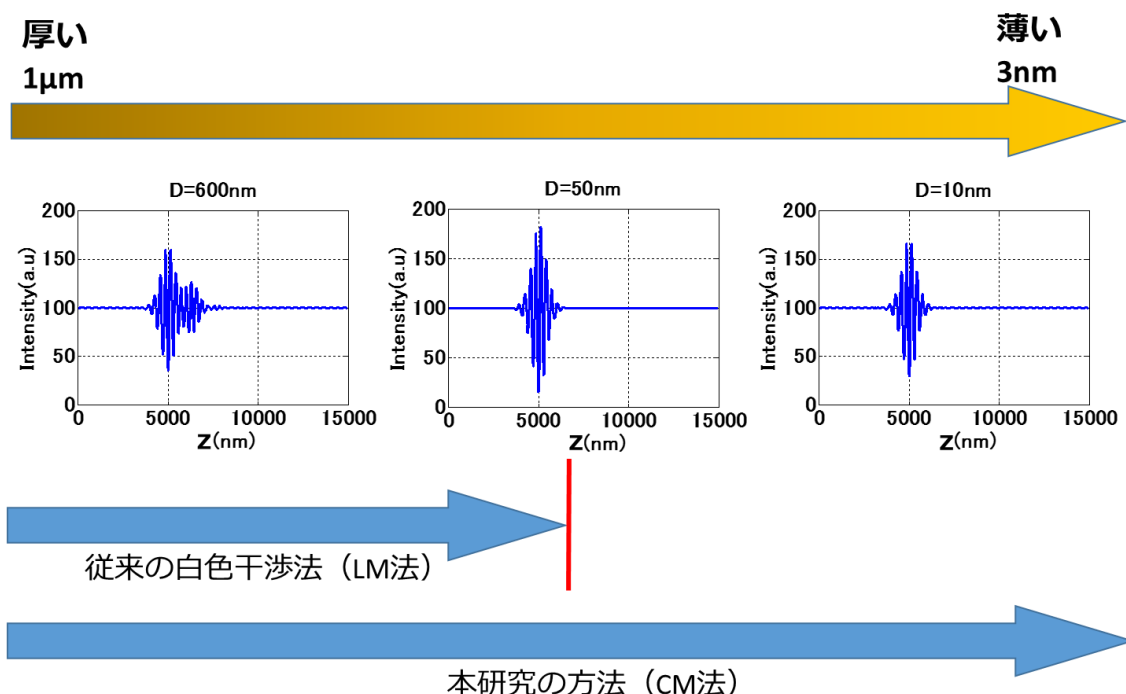


図.5.1 本研究の目的

具体的に位相を分析することにより、極めて薄い透明電極 ITO 膜厚を解析することを説明する。白

色干渉インターフェログラムをフーリエ変換してから、周波数情報と位相情報は比例の関係が取られた。従来の FDA アルゴリズムに基づいて、位相情報を分析し、厚い透明電極 ITO 膜厚を計測することが可能である。この位相情報は、光路差 $h$ から引き起こす位相 $\phi_L(k, h)$ と反射による位相変化 $\phi_D(k, n_2, d)$ の二つからなる。

第四章の式 4.13 により、垂直入射を仮定すると、透明膜の内部の反射による位相変化は波長、屈折率、膜厚に依存している。本章では、主に膜内部の反射による位相変化 $\phi_D(k, n_2, d)$ により、極めて薄い (50nm 以下) 透明膜の厚さを計測するアルゴリズムの開発を行う。

## 5.1 非線形位相 $\phi_D$ に基づいた膜厚の計測原理

従来の LM 法では、図.4.9 に示すように、フーリエ変換してから、位相 $\phi_t$ が得られた。この位相 $\phi_t$ は光路差 $h$ と膜厚 $D$ と関係がある。次に、位相 $\phi_t$ のモデルの評価関数をたて、非線形最小二乗法により、最適な光路差 $h$ と膜厚 $D$ を探す。LM 法の限界のため、極めて薄い (50nm 以下) 透明膜の厚さを計測するために、本研究では、FDA アルゴリズムにより、カーブマッチング法 (Curve Matching、CM 法) を開発する<sup>48,55)</sup>。

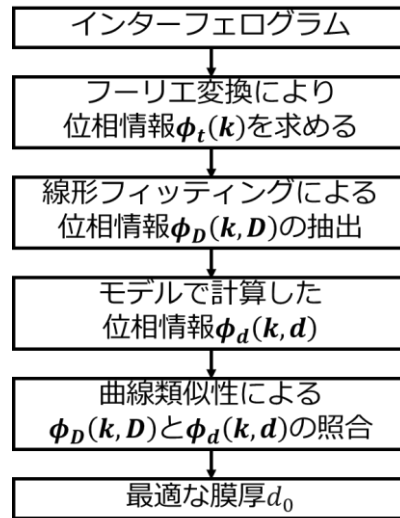


図.5.2 CM 法で計測過程

膜内部の反射による位相変化 $\phi_D$ は波長、屈折率、膜厚に依存しているため、位相 $\phi_D$ により透明膜の厚さを計測することが可能である。図.4.9 と図.5.2 に示すように、CM 法は LM 法と比較して、位相のモデル $\phi_d$ だけたて、実際の位相データ $\phi_D$ と照合するにより、最適な膜厚 $d$ だけ探す方法である。したがって、CM 法は計算量の上で、LM 法より甚だ小さくなった。

次には、白色インターフェログラムをフーリエ変換してから、得られた位相 $\phi_t$ からこの非線形位相 $\phi_D$ の抽出を説明する。

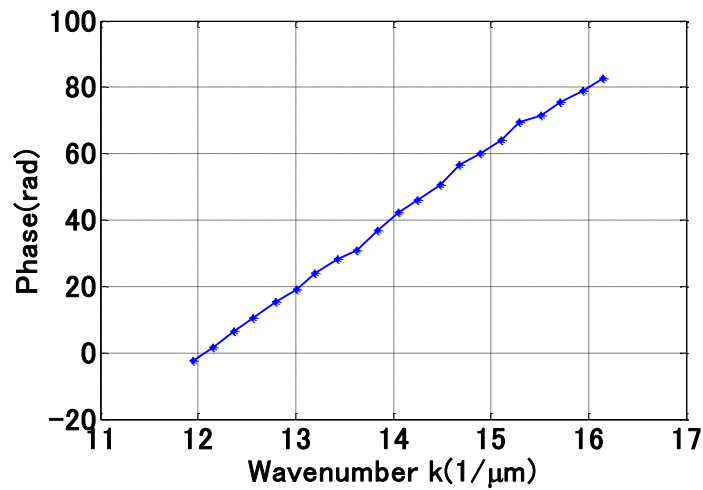
## 5.2 線形フィッティングによる非線形位相 $\phi_D$ の抽出

本節では、位相 $\phi_t$ から、非線形位相 $\phi_D$ を抽出する方法及び検証を具体的に説明する。

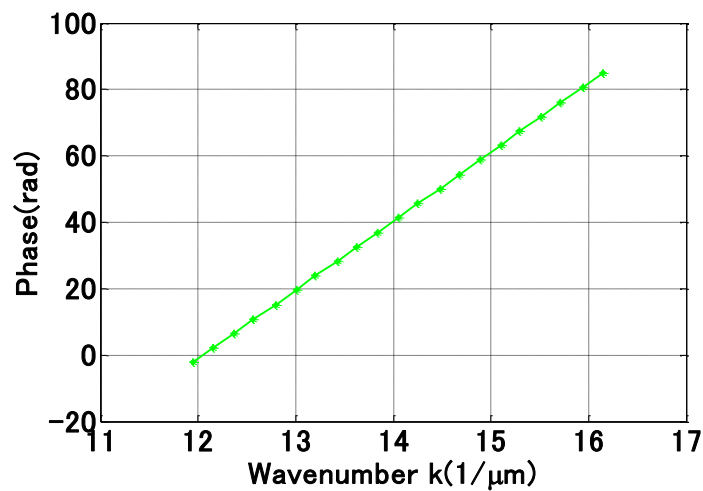
白色インターフェログラムをフーリエ変換して、位相 $\phi_t$ が得られた。

薄膜を計測する場合に、図.5.3 (a) のような位相 $\phi_t$ は、線形位相 $\phi_L$ と非線形位相 $\phi_D$ の部分を含んでいる。位相 $\phi_L$ は光路差から引き起こす位相であり、この部分の位相 $\phi_L$ は線形にしたがって、線形フィッティングにより、求めることが可能である。位相 $\phi_D$ は膜内部の反射による位相変化であり、この位相変化 $\phi_D$ は非線形であり、位相 $\phi_L$ と比べて極めて小さい。

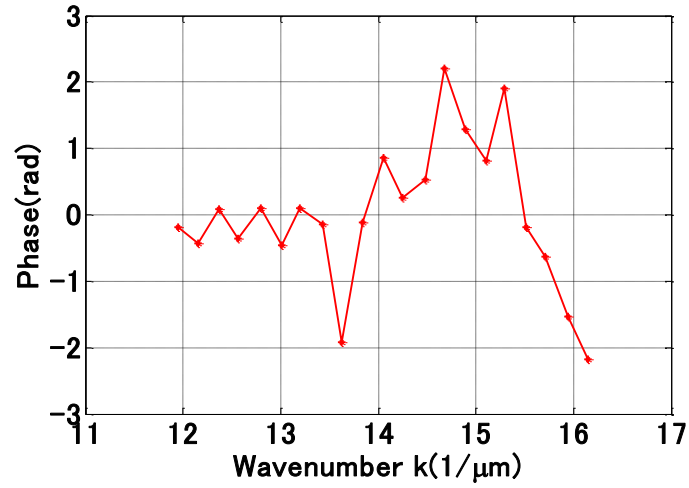
位相 $\phi_L$ は位相変化 $\phi_D$ よりも十分に大きく、線形関係に従う。したがって、図.5.3 (a) のような位相 $\phi_t$ を線形フィッティングして、図.5.3 (b) のような位相 $\phi_L$ を求めることが可能である。位相 $\phi_t$ と位相 $\phi_L$ 両者の差値は図.5.3 (c) のような位相変化 $\phi_D$ になる<sup>48,55)</sup>。



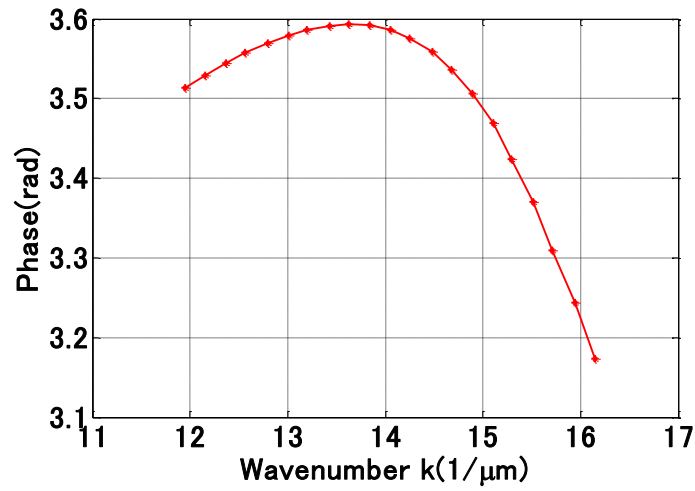
(a) フーリエ変換した位相 $\phi_t$



(b) 線形部分の位相 $\phi_L$



(c) 抽出した位相 $\phi_D$  (指示膜厚 90nm の実験データ)

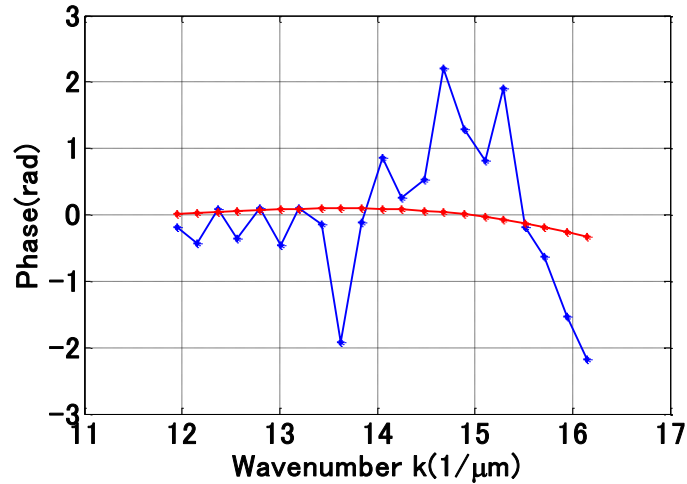


(d) 理論的な非線形部分の位相 $\phi_d$  ( $d=94\text{nm}$ )

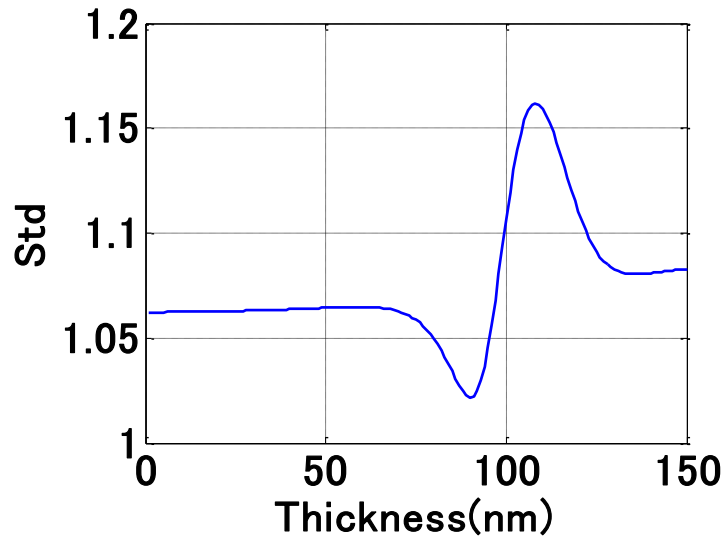
図.5.3 線形フィッティングによる非線形位相 $\phi_D$ の抽出

それから、抽出した位相変化 $\phi_D$ は、図.5.3 (d) のような理論的なモデル位相変化 $\phi_d$  ( $d=90\text{nm}$ ) と容易に照合するため、平行移動して、図.5.4 (a) のような位相変化 $\phi_d$  (赤い線) になった。図.5.4 (b) のような標準偏差を計算するにより、最適な膜厚 ( $d_0=90\text{nm}$ ) を求めることが可能である。

本文では、位相 $\phi_D$ は実際のデータから抽出した位相であり、位相 $\phi_d$ はシミュレーションの位相モデルである。



(a) 抽出した位相 $\phi_D$ と理論的なモデル位相変化 $\phi_a$ の照合



(b) 計測結果

図.5.4 位相 $\phi_D$ と位相 $\phi_a$ の比較

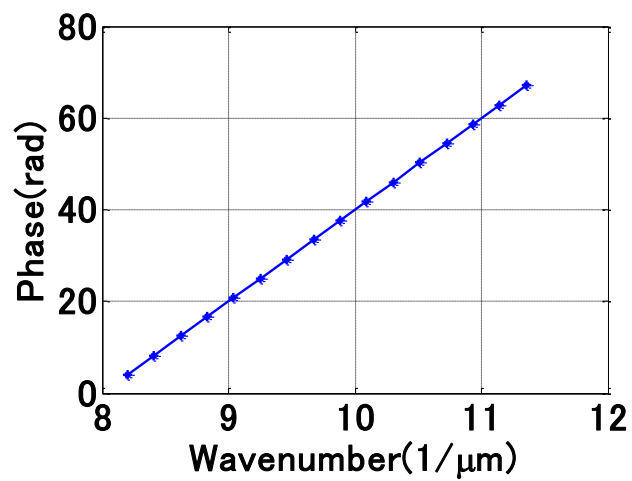
ここまで述べたように、線形フィッティングによる非線形位相 $\phi_D$ の抽出により、理論的に透明膜の厚さを計測することが可能である。

位相 $\phi_t$ から非線形位相 $\phi_D$ を抽出する可能性を検証するために、シミュレーションを行う。

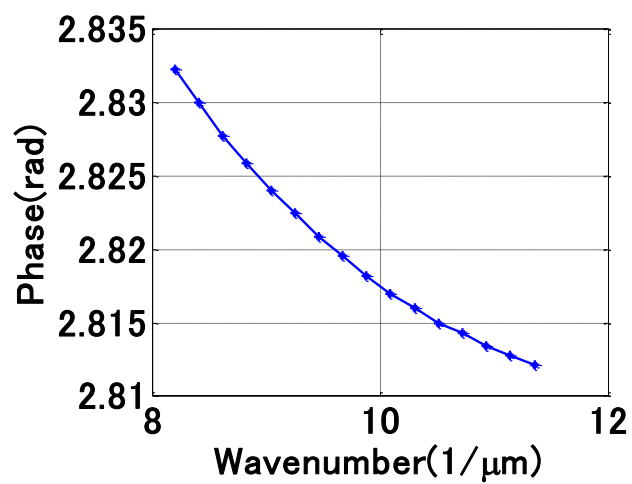
位相 $\phi_t$ は光路差が引き起こす位相 $\phi_L$ と膜内部の反射による位相変化 $\phi_D$ を含んでいるため、図.5.5 (a) と (b) のようなシミュレーションの位相 $\phi_L$ とシミュレーションの位相変化 $\phi_D$ が得られた。図.5.5 (c) のような合成位相 $\phi_t$ を計算することが可能である。

位相 $\phi_t$ は線形フィッティングにより、図.5.5 (d) のような位相 $\phi_L$ が得られ、図.5.5 (e) のような計算する膜内部の反射による位相変化 $\phi_D'$ も得られた。位相 $\phi_t$ から位相 $\phi_D$ が抽出できるかどうかは、理論の位相 $\phi_D$ と計算した位相 $\phi_D'$ 同じかどうかによる。

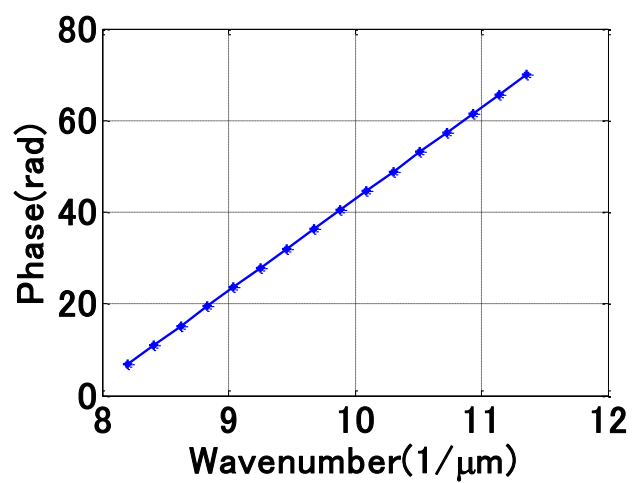
$\phi_D$ と $\phi_D'$ 同じかどうか検証するため、両者の差値 $\phi_{DL}$ を計算した。ここで、 $\phi_{DL}$ は線形フィッティングにより、位相 $\phi_t$ から抽出した非線形位相 $\phi_D$ の線形部分である。



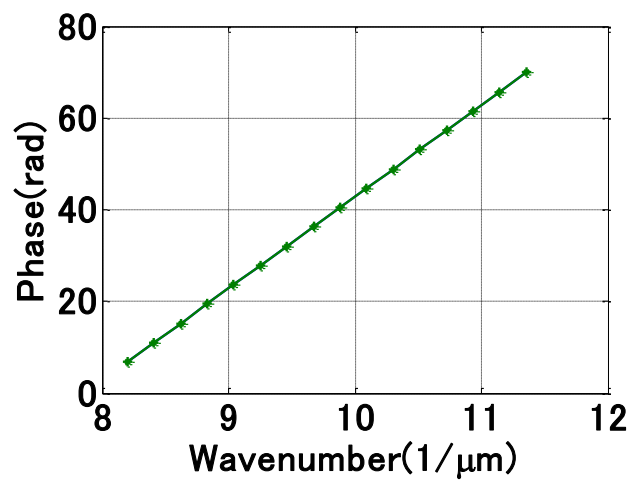
(a) シミュレーションの位相 $\phi_L$



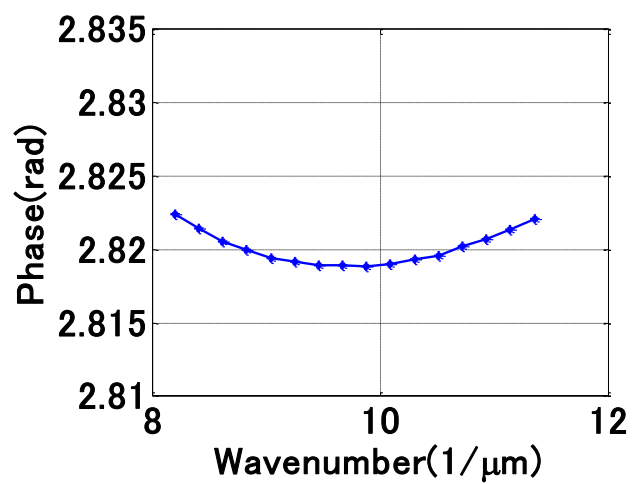
(b) シミュレーションの位相 $\phi_D$



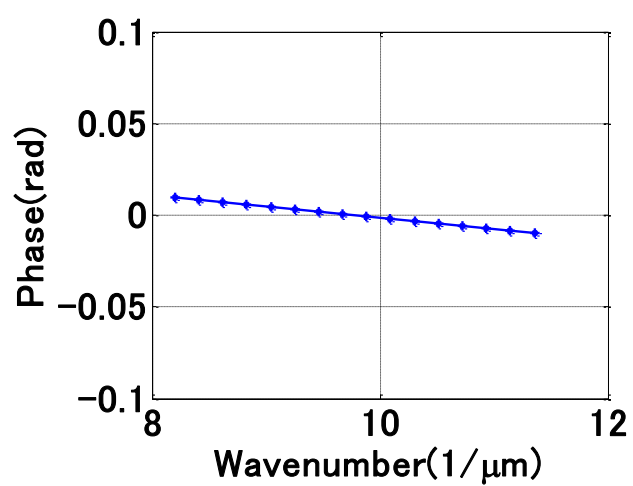
(c) 合成位相 $\phi_t = \phi_L + \phi_D$



(d) 線形フィッティングの位相 $\phi_l$



(e) 計算位相 $\phi_D' = \phi_t - \phi_l$

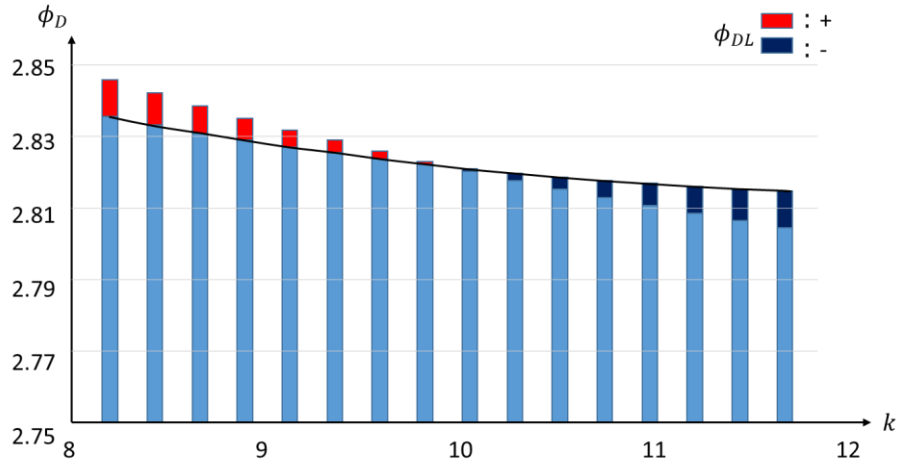


(f)  $\phi_{DL} = \phi_D - \phi_D'$

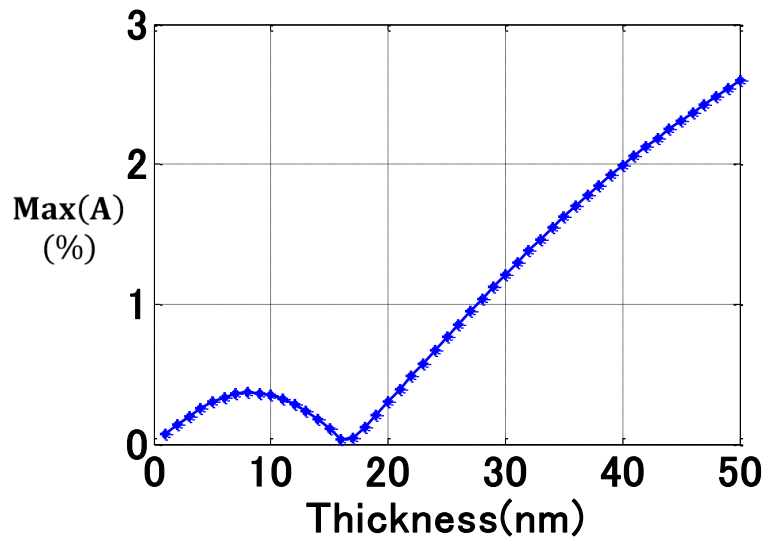
図.5.5 シミュレーションによる、線形フィッティング



図.5.6 (a) に示すように、非線形位相 $\phi_D$ の線形部分 $\phi_{DL}$ と非線形位相 $\phi_D$ の比例である。縦軸は $A = \frac{\phi_{DL}}{\phi_D}$ である。(膜厚は 10nm である場合に、 $A = 0.35\%$ )



(a) 膜厚は 10nm である場合の比例



(b) 計測結果

図.5.6 非線形位相 $\phi_D$ の線形部分の比例

50nm 以下の薄膜を計測する場合に、異なる膜厚によって、図.5.6 (b) に示すように、 $A$ の最大値の範囲は 0~2.6% であり、これは非線形位相 $\phi_D$ の線形部分の比例の計測結果である。図.5.6 (b) により、50nm 以下の場合に、 $\phi_D$ と $\phi_D'$ はほぼ同じであるといえる。つまり、線形フィッティングによる抽出した非線形位相 $\phi_D$ の線形部分 $\phi_{DL}$ は計測結果に影響があるが、この影響は小さいことである。本研究では 50nm 以下の薄膜を計測する場合に、この影響は無視できるレベルに達す。

## 5.3 カーブマッチング法（CM 法）による位相の照合

上節では、非線形位相 $\phi_D$ が得られた。本節では、具体的に非線形位相 $\phi_D$ を分析することを通じて、極めて薄い透明電極 ITO 膜厚を解析することを説明する。

本研究で、位相変化 $\phi_D(k, n_2, D)$ は非線形部分の位相である。この部分の位相と一番の類似曲線を探す過程は、開発する CM 法である。この過程は、図.5.7 に示すように、本研究では透明電極 ITO 膜厚の計測手順を示す。三次元データの生成後に、インターフェログラムを導き出した。このインターフェログラムを高速フーリエ変換して、位相 $\phi_t$ から非線形部分の位相 $\phi_D$ を抽出する。一連の理論的に非線形位相のモデル $\phi_d$ をたててから、一つずつ照合して、曲線類似性により、透明電極 ITO 膜厚を計測することを行う。

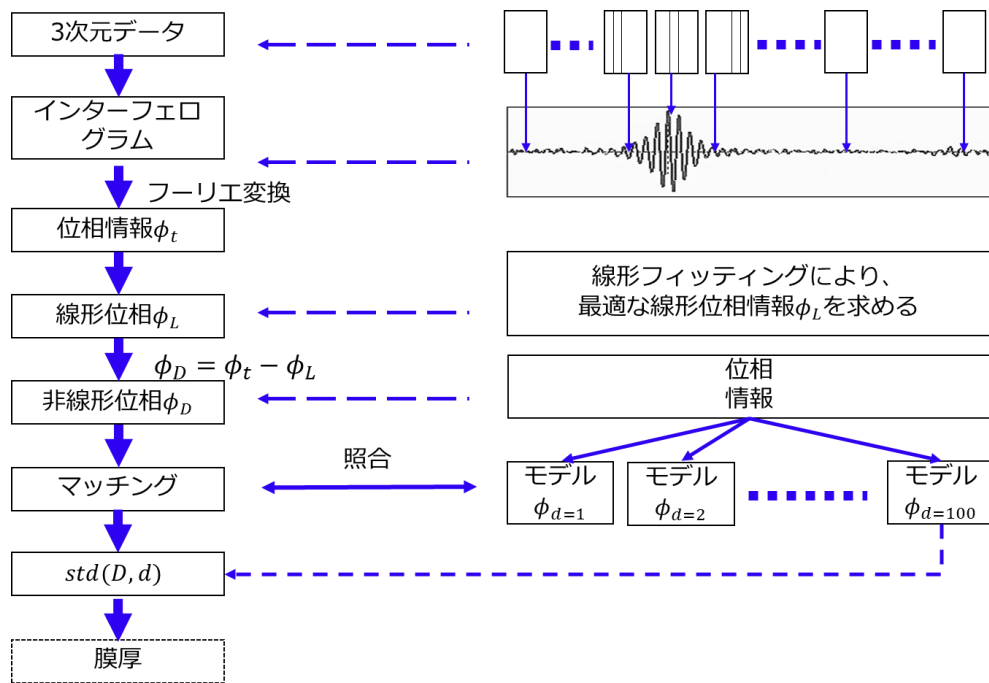


図.5.7 透明電極 ITO 膜厚の計測手順

カーブマッチング法（Curve Matching、CM 法）というのは、二つの曲線間の類似性を計測する方法である。CM 法は計算幾何学の領域で広く研究されてきた<sup>48,55)</sup>。

### 5.3.1 CM 法による曲線類似性の判定原理

CM 法を開発するために、類似性の定義を説明することが必要である<sup>48,55,72)</sup>。

類似性分析はパターン認識、コンピュータグラフィックス、バイオニクスなどの領域で広範な応用を持っている。二つのモデルの空間分布は一致するかどうか評価すると、空間分布の類似性を分析することが必要になる。そして、評価基準及び評価方法は定量化されなければならない。異なる線形の

場合に、通常に曲線の類似性に関連している。

例えば、標本  $D = \{d_1, d_2, \dots, d_n\}$  は曲線 A と B が対応する集合 P と Q の比の標本を仮定すると、 $D$  の平均値は  $\bar{D}$  であり、分散は  $\sigma^2$  である。 $d_i$  は確率  $F(z)$  の信頼区間にある時に、即ち

$$D \in [\bar{D} - z\sigma, \bar{D} + z\sigma], i \in \{1, 2, \dots, n\} \quad (4.1)$$

である時に、 $D$  は正規分布している。

この中で、 $z$  は確率  $F(z)$  の確率変数であり、 $z$  と  $F(z)$  の間の関係は表 5.1 のように示す。

表 5.1  $z$  と  $F(z)$  の間の関係

$z$	1	1.65	1.96	2	2.58	3
$F(z)$	0.6827	0.9000	0.9500	0.9545	0.9900	0.9973

曲線 A が対応する集合 P の中で第  $i$  点の  $P_i$  は曲線 B が対応する集合 Q の要素であると。この時、点  $P_i$  は集合 Q の要素であると略称する。このような  $P_i \in P$  で集合 Q の要素である点の個数が  $k$  であると、 $k/n$  は曲線 A と B が対応する集合 P と Q の間の類似度である。

標準偏差は、日本工業規格では、分散の正の平方根と定義している。データや確率変数の散らばり具合を表す数値の一つであるため、最小の類似度は標準偏差により評価している<sup>70)</sup>。

$$\sigma = \sqrt{\sigma^2} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (d_i - \bar{D})^2} \quad (4.2)$$

本研究では、図.5.8 に示すように、膜厚が 90nm である実際のデータの位相の曲線  $\phi_D(k_i)$  とモデルの位相の曲線  $\phi_d(k_i)$  の類似性を比較して、両者の距離差  $x(k_i)$  を計算して、

$$x(k_i) = \phi_D(k_i) - \phi_d(k_i) \quad (4.3)$$

になる。ここで、 $k$  は波数である。

標準偏差の式 4.4 により、距離のばらつきを判定する。

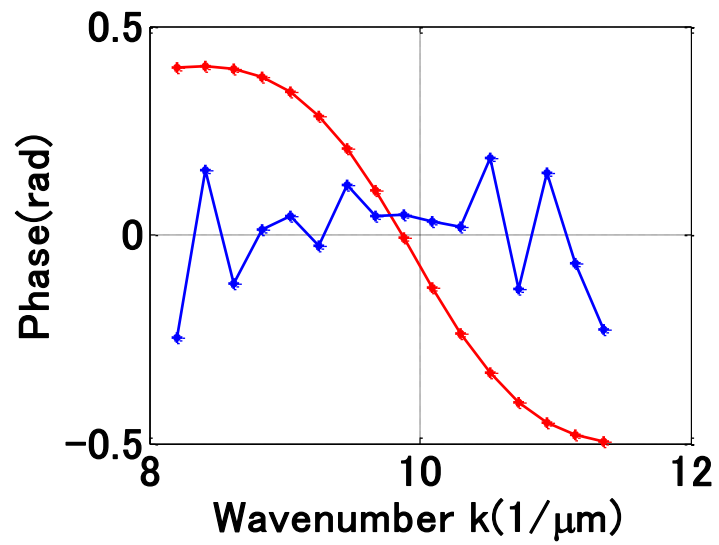
$$std(D, d) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [x(k_i) - \bar{x}]^2} \quad (4.4)$$

ここで、 $\bar{x}$  は  $x(k_i)$  の平均値である。

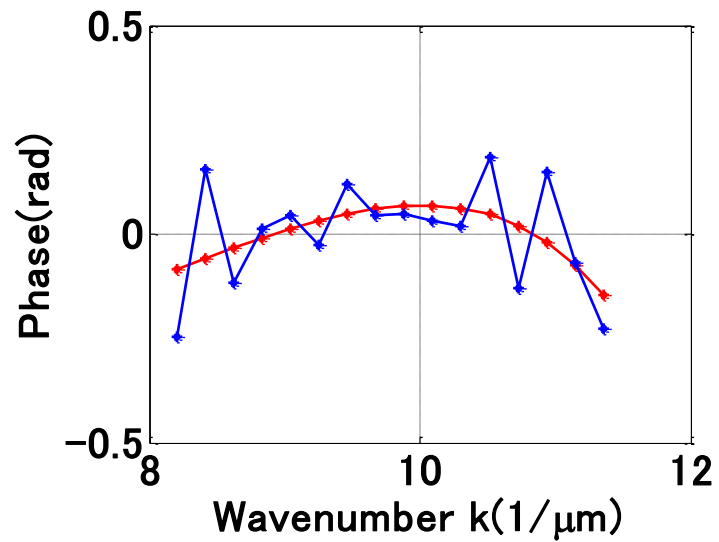
図.5.8 (a) に対応する図.5.9 (a) に示すように、 $d = 150\text{nm}$  であるモデルの位相の曲線  $\phi_d(k_i)$  と比較して、ばらつきが大きいために、曲線の類似性が悪いと言える。

図.5.8 (b) に対応する図.5.9 (b) に示すように、 $d = 90\text{nm}$  であるモデルの位相の曲線  $\phi_d(k_i)$  と比較して、ばらつきが小さいために、曲線の類似性が良いと言える。(分かり易くするため、図.5.8 (a) と図.5.8 (b) での赤いモデルの位相の曲線  $\phi_d(k_i)$  は平行移動を行った)

ばらつきが小さい ( $std(D, d)$  が小さい) ほど、曲線の類似性が良いと言える。両者の距離差は全部近似している ( $std(D, d) = 0$ ) 時に、二つの曲線の類似性は同じだと言える。

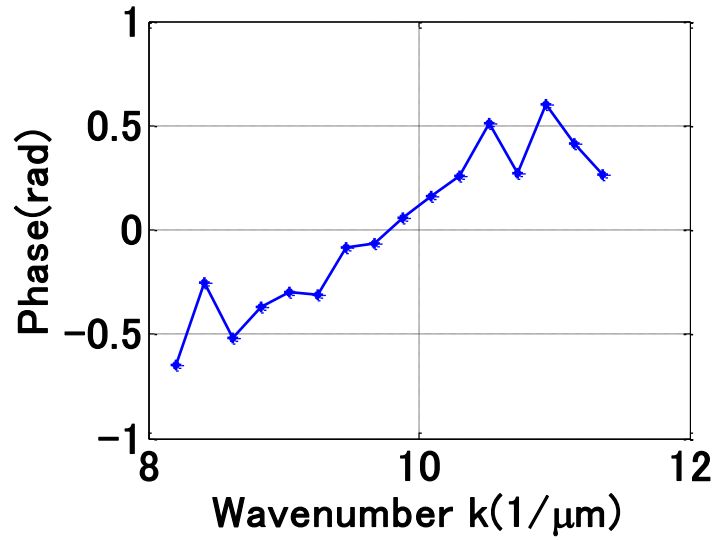


(a) 曲線が近似していない ( $d = 150\text{nm}$ )

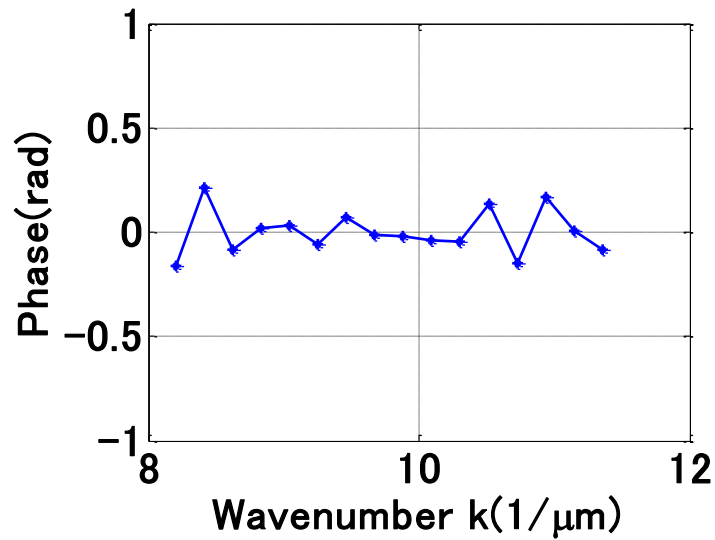


(b) 曲線が近似している ( $d = 90\text{nm}$ )

図.5.8 曲線類似性の比較



(a) 曲線の距離差が変動している ( $std = 0.3635$ )



(b) 曲線の距離差が変動していない ( $std = 0.1028$ )

図.5.9 曲線類似性の判定

図.5.10 上に示すように、実際の計測データ $\phi_D$ （膜厚は 9nm）が得られた。Matlab ソフトウェアでシミュレーションして、異なる膜厚 $d$ に対応して、理論的に一連の反射による位相変化 $\phi_d$ のモデルをたてることが可能である。計測の位相 $\phi_D$ は一連のモデル位相 $\phi_d$ と一つずつ照合して、曲線の類似性により、サンプルの膜厚を求めることが可能である。図.5.10 下に示すように、標準偏差の最小値に対応する膜厚は、計測したサンプルの膜厚である。

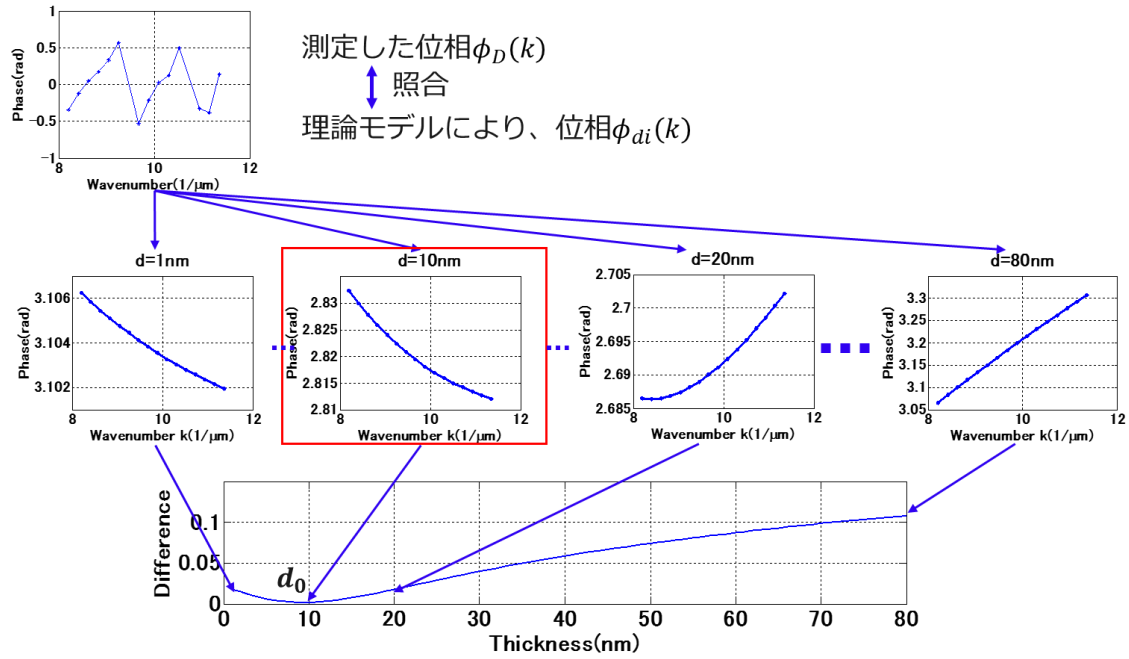


図.5.10 カーブマッチング法により、類似性の判定

ここで、 $D$ はサンプルの膜厚、 $d$ はモデルの膜厚、 $d_0$ は計測の膜厚である。

上述で、位相 $\phi_D$ に基づいて、曲線の類似性により、開発した方法は、カーブマッチング法と呼ぶ。CM法と略称する。図.5.10に示すように、従来のFDAアルゴリズムと曲線類似性に基づいて、開発したCM法により、非常に薄い透明電極ITO膜厚分布を計測できるようになった<sup>48,55)</sup>。

### 5.3.2 CM法のシミュレーション結果

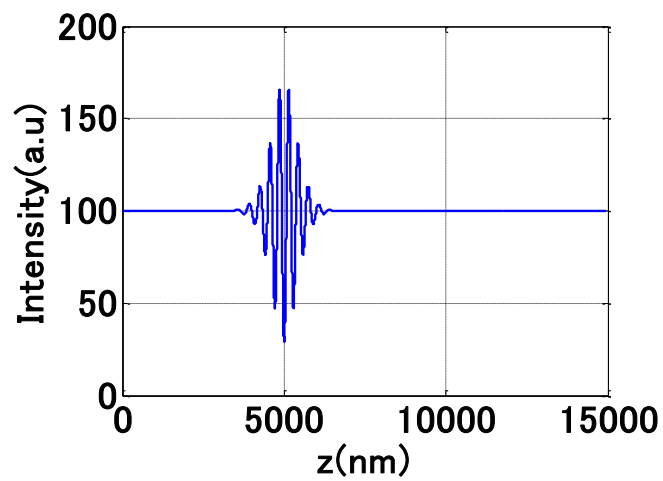
上節で開発したCM法で、図.5.11に示すように、理論的に9nmの透明電極ITO膜のモデルをたてた膜厚を計測する。シミュレーション結果をみると、計測した膜厚は9nmである。

位相情報により膜厚を計算するCM法の手順を詳しく説明する<sup>48,55)</sup>。

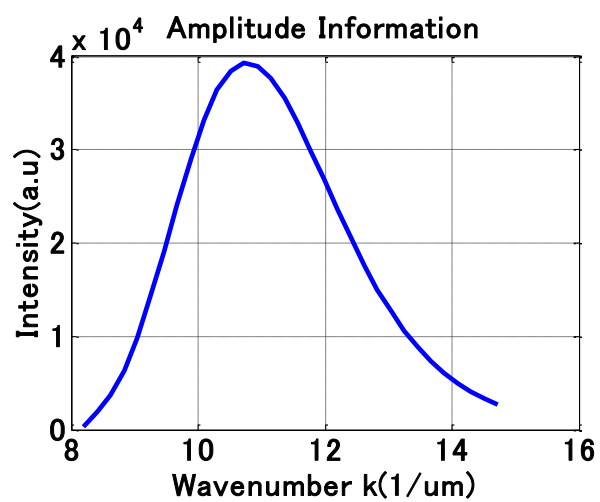
図.5.11 (a) のインターフェログラムをフーリエ変換してから、得られた振幅情報と位相情報を図.5.11 (b) と図.5.11 (c) のように示す。

MatLabソフトウェアで位相情報を線形フィッティングする方法を通じて、光路差から引き起こす位相が求められて、この位相は図.5.11 (d) のような線形関係になる。総位相情報の中にこの線形部分位相情報を除いて、実際に透明電極ITO膜の膜内部の反射による位相変化が求められる。

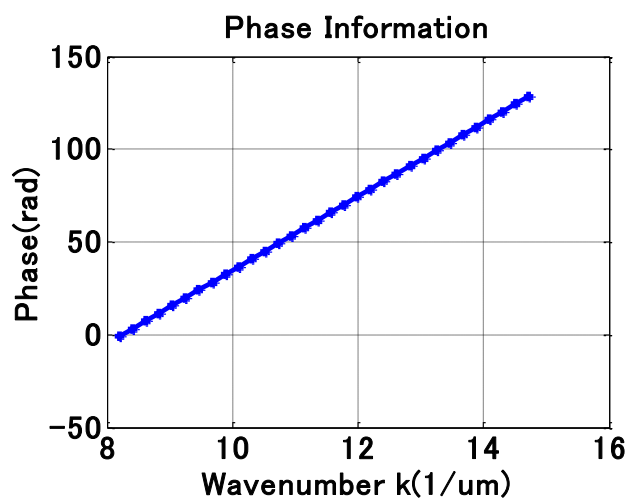
同様にMatLabソフトウェアを利用して、透明電極の膜内部で異なる膜厚のために、一連の反射による位相変化のモデルをたてることができ、図.5.11 (e) に示すようになる（膜厚が9nmである）。計算した位相 $\phi_d$ は一連の理論的な位相モデルと一つずつ照合して、それぞれのデータの標準偏差を求めて、その中で最小値を持つ膜厚がサンプルの膜厚である。図.5.11 (f) から、計測結果は9nmと分かる。



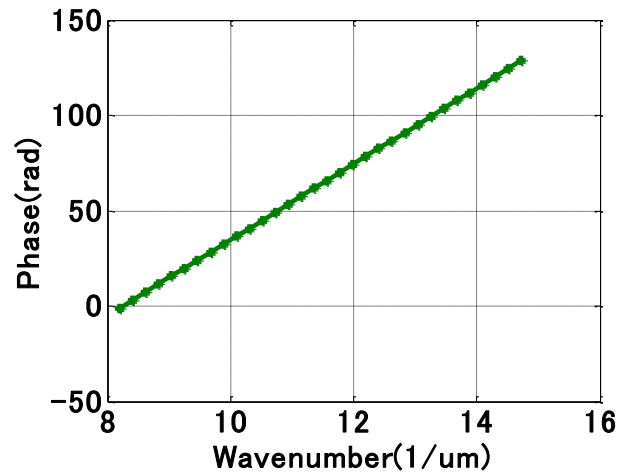
(a) インターフェログラム



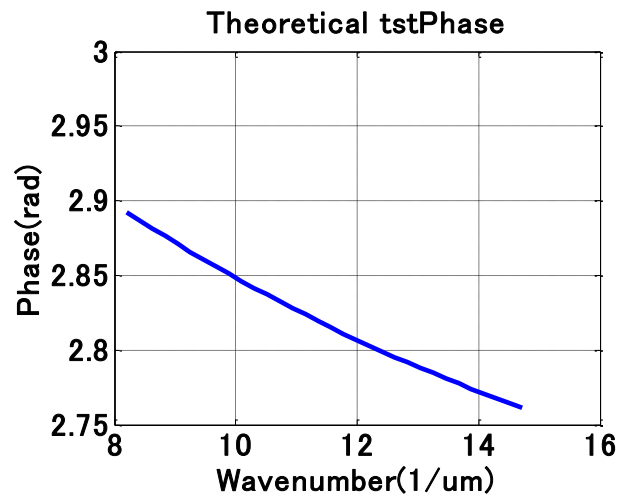
(b) 振幅情報



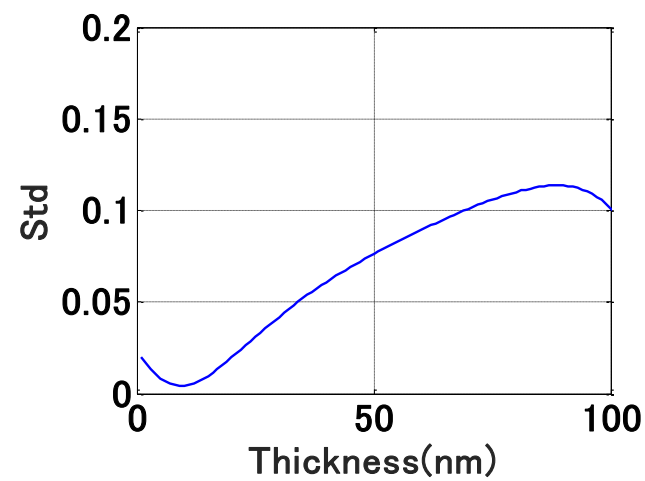
(c) 位相情報



(d) 線形フィッティングにより光路差から引き起こす位相



(e) 反射による位相変化



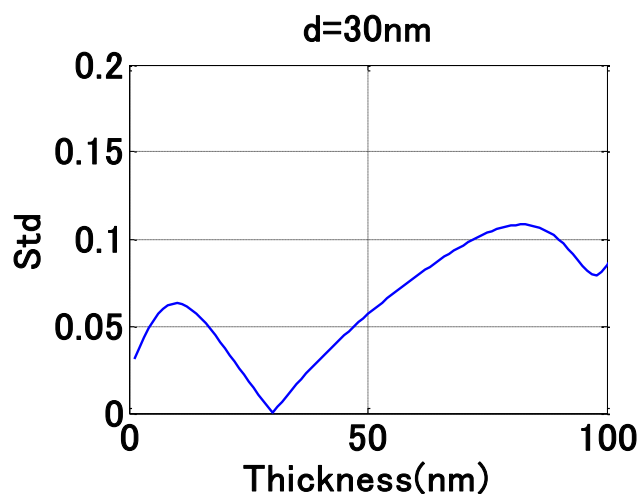
(f) 各データの標準偏差

図.5.11 9nm の透明電極 ITO 膜のシミュレーション

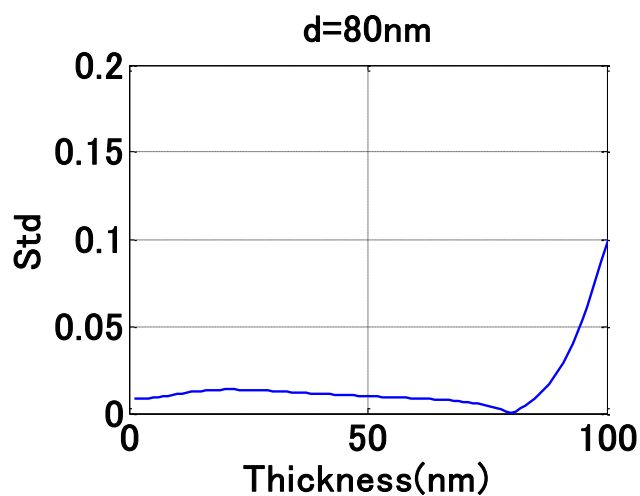


ここまで、開発した CM 法で理論的に 9nm の透明電極 ITO 膜が計測できるといえる。

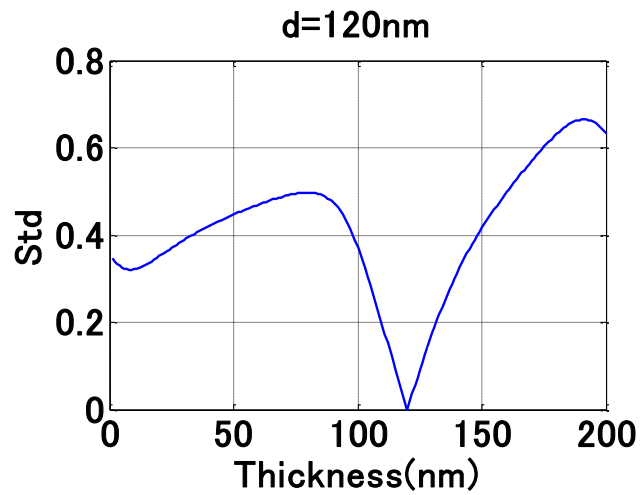
そして、図.5.12 (a) ～ (d) に示すように、膜厚が $d=30\text{nm}$ 、 $d=80\text{nm}$ 、 $d=120\text{nm}$ 、 $d=800\text{nm}$  の場合について標準偏差を計算して、膜厚を求めた。その結果、図.5.12 (e) のようなシミュレーション結果が得られた。ここまで、開発した CM 法で、数値計算により、 $2\mu\text{m}$  以内の透明電極膜の膜厚を問わず、膜厚が正確に計測できることがわかった。



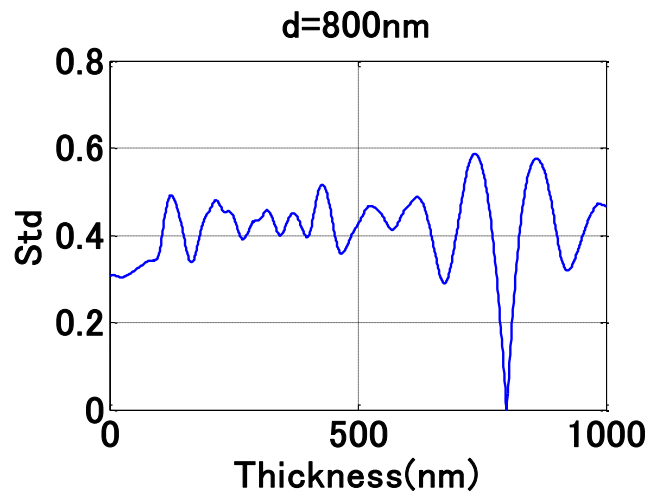
(a) 計測結果は 30nm である



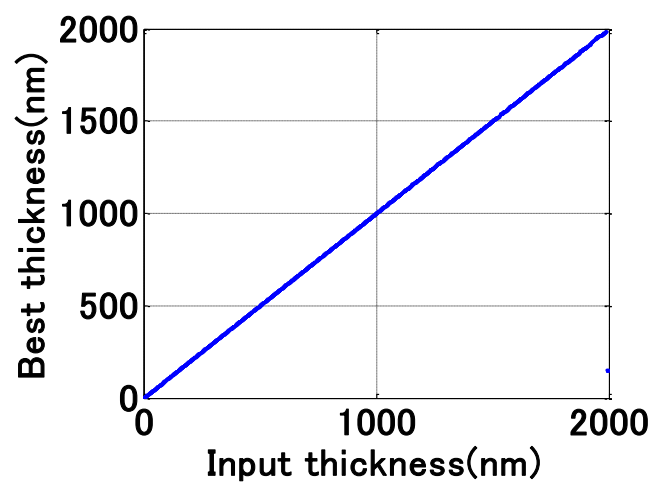
(b) 計測結果は 80nm である



(c) 計測結果は 120nm である



(d) 計測結果は 800nm である



(e)  $2\mu\text{m}$  以内膜厚の計測結果

図.5.12 CM 法のシミュレーション結果

## 5.4 CM 法と LM 法の比較

Kim 氏が提出した LM 法はインターフェログラムをフーリエ変換してから、得られた位相情報を分析することにより、非線形最適化手法で最適なモデル評価関数を探してから、対応の膜厚を計算することが可能である。透明電極 ITO 膜の膜内部の反射による位相変化が極めて小さいため、LM 法は 50nm 以下の非常に薄い透明電極 ITO 膜厚を計測することに適用されない。

本研究で開発した CM 法では、理論的な反射による位相変化モデルをたてて、一つずつ実際の位相と照合してから、両者の曲線類似性により、膜厚を計算することが可能である。

表 5.2 LM 法と CM 法の比較

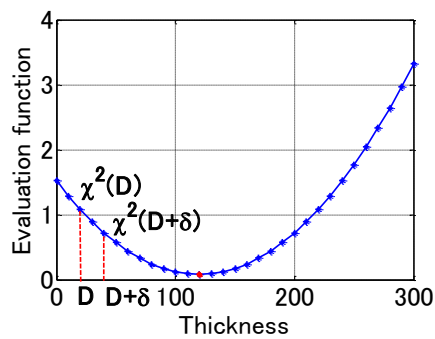
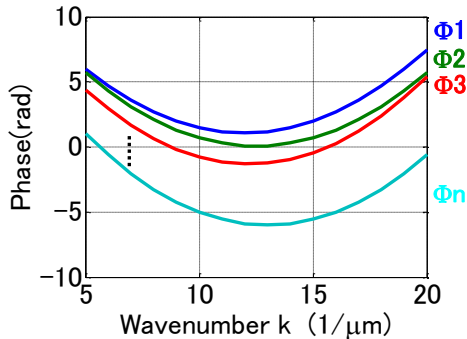
	LM 法	CM 法
イメージ 原理図		
パラメータ	光路差 $h$ と膜厚 $D$	膜厚 $D$ だけ
原理	非線形最小二乗法	曲線類似性
計測範囲	50nm-2 $\mu$ m	5nm-2 $\mu$ m
計測精度	0.1nm	0.01nm
相対計測量	$1 \times 10^4$	1

表 5.2 では、原理、計測範囲、計測精度と相対計測量について、LM 法と CM 法を比較し、違いを明らかにすることができた。

## 第六章 極めて薄い透明膜の厚さを計測する CM 法の改良

第五章では、開発した CM 法では、理論的に、9nm の透明電極 ITO 膜厚が計測できることがわかる。しかし、実際には、CM 法では 9nm の透明電極 ITO 膜厚が計測できない。この問題に対して、実際に膜厚を計測するためには、CM 法を改良することが必要である。

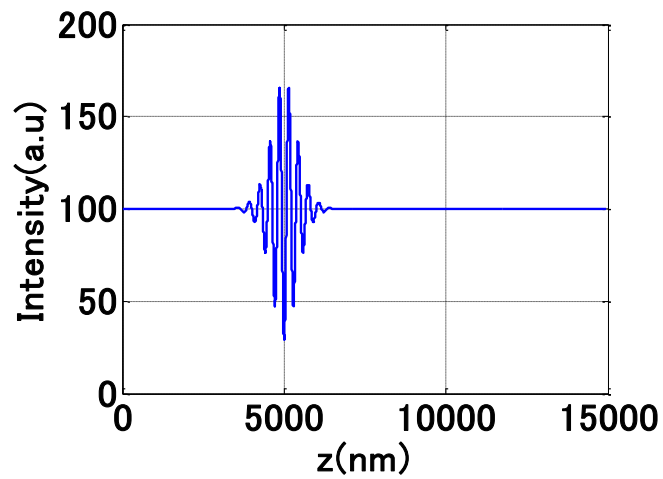
### 6.1 CM 法の安定性とノイズの関係

本節では、50nm 以下の膜厚を計測するかどうか検討を行う。極めて薄い透明電極 ITO 膜厚を計測するアルゴリズムの開発を行う。実際に 9nm の透明電極 ITO 膜が計測できない原因を調べるため、理論的に 9nm の透明電極 ITO 膜のシミュレーションを行って、CM 法を改良することが必要である<sup>54)</sup>。

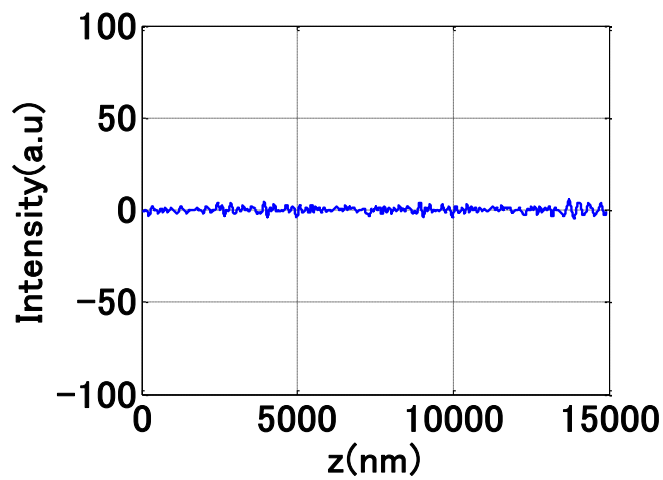
透明膜の膜厚を計測する時には、膜厚が薄いほど膜内部の多重反射が多いために、白色干渉により現れたノイズが多いことがわかる。つまり、膜厚が薄いほどノイズの影響を受けやすいといえる。実際計測する場合に、必ずノイズがあるため、ノイズは計測結果に影響するかどうかを確認する。ノイズの影響を考慮して、実際に 9nm の透明電極 ITO 膜厚が計測できない原因であるかどうか確認する。

#### 6.1.1 ノイズの影響

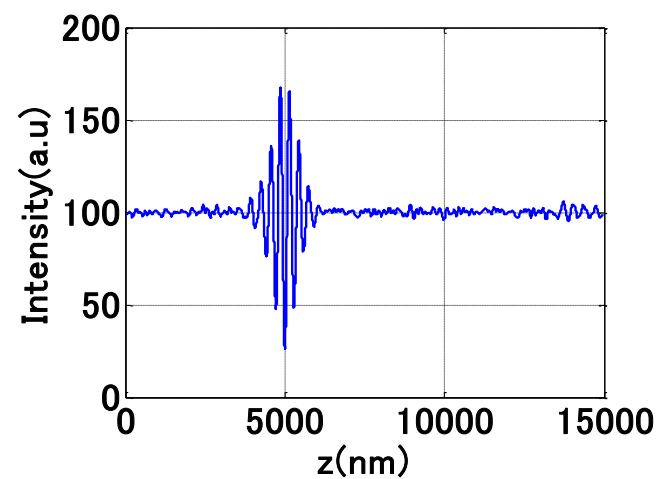
本研究では、ノイズの影響を確認するために、図.6.1 (a) のような 9nm の透明電極 ITO 膜のシミュレーションの白色光干渉信号に、図.6.1 (b) のような CCD カメラの熱ノイズ信号を追加して、元のインターフェログラムに切り替えた。CCD カメラ熱ノイズを追加した信号は、図.6.1 (c) のように示される。この場合に、図.6.1 (d) に示すように、開発した CM 法では 9nm の透明電極 ITO 膜厚が正確に計測できなくなった。



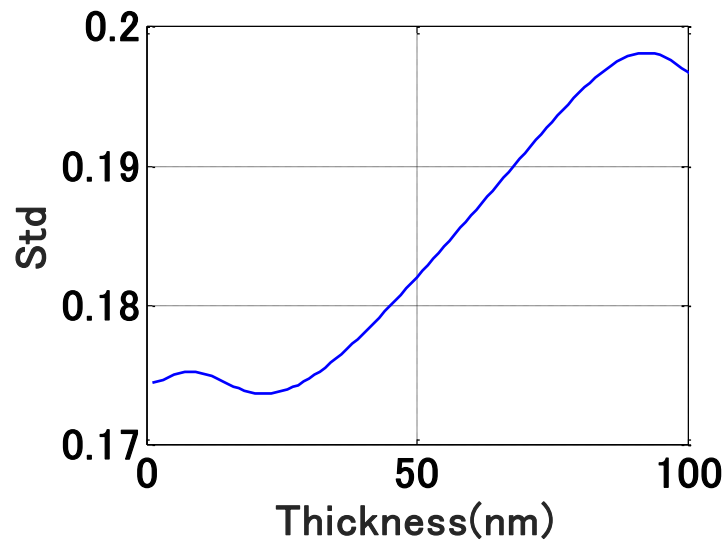
(a) シミュレーションの白色光干渉信号



(b) CCD カメラの熱ノイズの信号



(c) CCD カメラ熱ノイズを追加した信号



(d) 各データの標準偏差

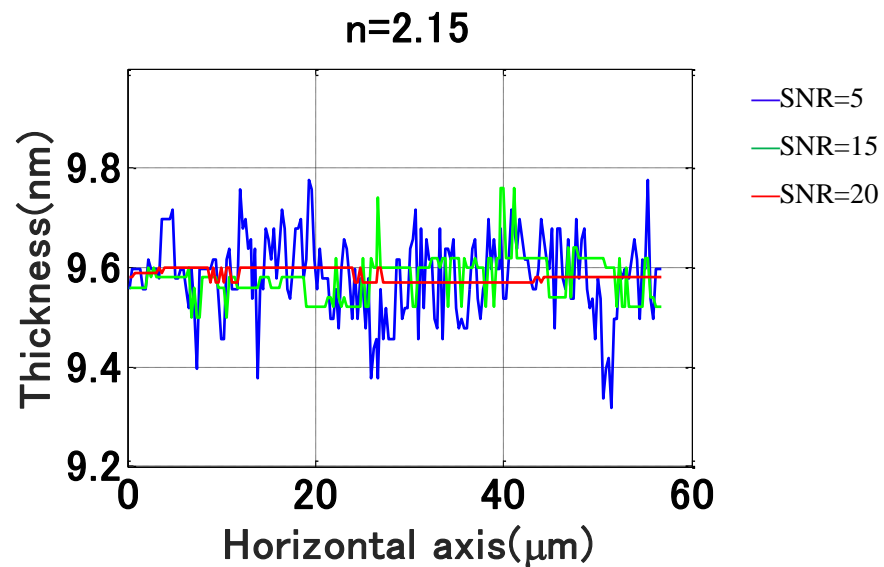
図. 6.1 ノイズを付加した 9nm の透明電極 ITO 膜のシミュレーション

上述により、ノイズは CM 法で 9nm の透明電極 ITO 膜を計測することができない原因といえる。

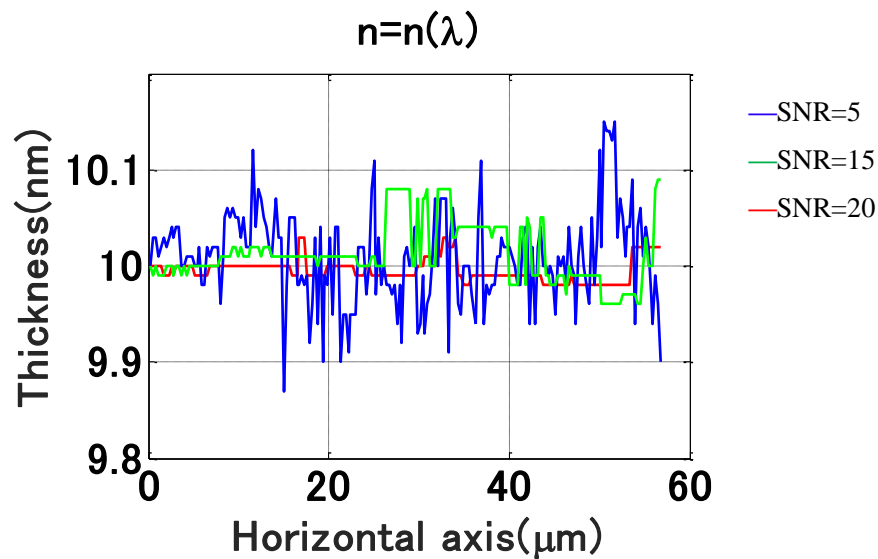
### 6.1.2 異なるノイズによる、計測結果の変化

本節で、異なるノイズによって、計測結果の変化を説明する。

本研究のシミュレーションでは、加えたノイズはホワイトガウスノイズである。このホワイトガウスノイズが信号雑音比（Signal-Noise Ratio : SNR）と関係があり、SNR が大きいほど、ノイズが小さい。ここで、SNR は信号の分散を雑音の分散で割った値である。ノイズが小さいほど、計測結果に影響が小さい。



(a) 屈折率が定数



(b) 屈折率分散の考慮

図.6.2 異なるノイズによる計測結果の変化

図.6.2 の異なるノイズを追加して、表 6.1 のような計測結果が得られた。

1. ノイズが小さいほど、標準偏差が小さい。計測結果は安定している。
2. SNR が一定以上になると、標準偏差がゼロになる。

表 6.1 ノイズが異なる時の標準偏差の計測結果

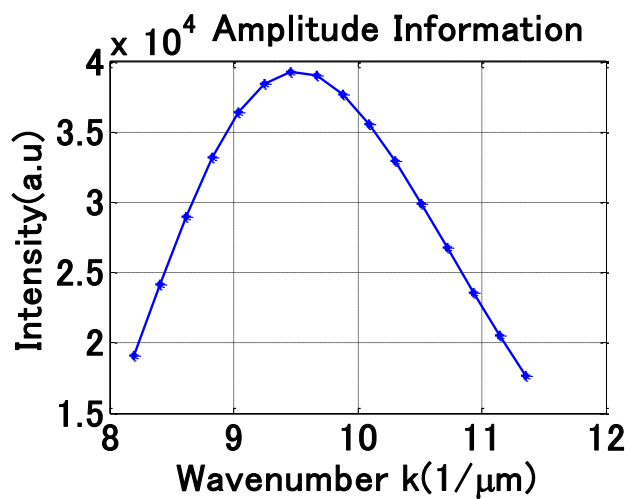
SNR	5	15	20
$n=2.15$	0.0829	0.0453	0.0129
$n(\lambda)$	0.0483	0.0314	0.0123

### 6.1.3 不安定データの生成原因

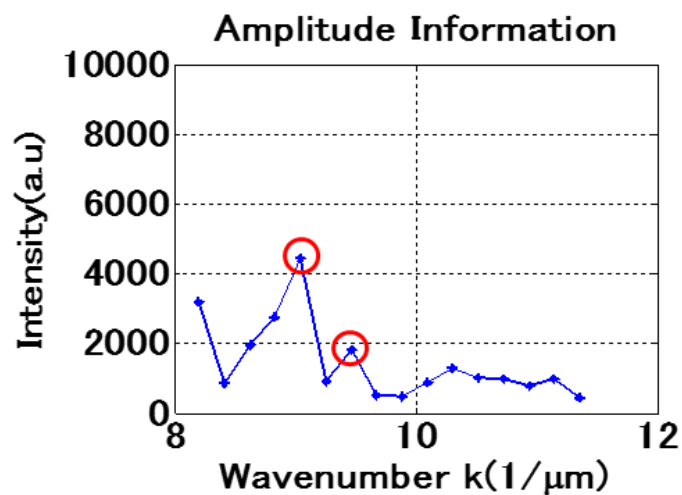
本節で、ノイズがあるため、不安定データの生成原因を説明する。

図. 6.1 (a)、(b)、(c) のようなシミュレーションの干渉信号をフーリエ変換すると、図. 6.3 (a)、(b)、(c) のような振幅情報が得られる。

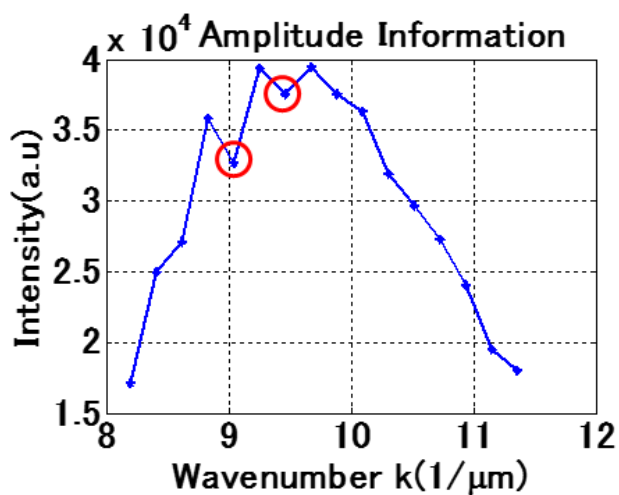
図. 6.3 (b) のノイズ信号の振幅情報を観察すると、図. 6.3 (c) のノイズを追加した信号の振幅情報と、同じピーク位置で、不安定になった。ここまで、計測する時にノイズがあるので、不安定データを引き起こしたといえる。



(a) ノイズがなし信号の振幅情報



(b) CCD カメラ熱ノイズ信号の振幅情報



(c) ノイズを追加した信号の振幅情報

図. 6.3 各信号の振幅情報



図. 6.3 (c) のような不安定データが生じる原因を説明する。

干渉信号を式 6.1、6.2 により、フーリエ変換すると、振幅情報が得られる。

$$\mathcal{F}_1(k) = |\mathcal{F}_1(k)|e^{j\phi_1(k)} \quad (6.1)$$

$$\mathcal{F}_2(k) = |\mathcal{F}_2(k)|e^{j\phi_2(k)} \quad (6.2)$$

ここで、 $|\mathcal{F}_1(k)|$ と $|\mathcal{F}_2(k)|$ はノイズがない信号とノイズ信号の振幅であり、 $\phi_1(k)$ と $\phi_2(k)$ はノイズがない信号とノイズ信号の位相変化である。

ノイズを追加した信号の振幅情報の式 6.3 になった。

$$\mathcal{F}(k) = \mathcal{F}_1(k) + \mathcal{F}_2(k) \quad (6.3)$$

展開して、式 6.4 になった。

$$\mathcal{F}(k) = |\mathcal{F}_1(k) + \mathcal{F}_2(k)|e^{j\phi(k)} = \{|\mathcal{F}_1| + |\mathcal{F}_2| + 2\sqrt{\mathcal{F}_1\mathcal{F}_2} \cos[\phi_1 - \phi_2]\}e^{j\phi(k)} \quad (6.4)$$

ここまで、図. 6.3 (c) のような不安定データはノイズがない信号とノイズ信号のそれぞれの振幅と位相差に決めていることを確認した。

次節に 9nm の膜厚が計測できるようにして、これらの不安定データを除く方法を説明する。

## 6.2 振幅情報による不安定データの除去

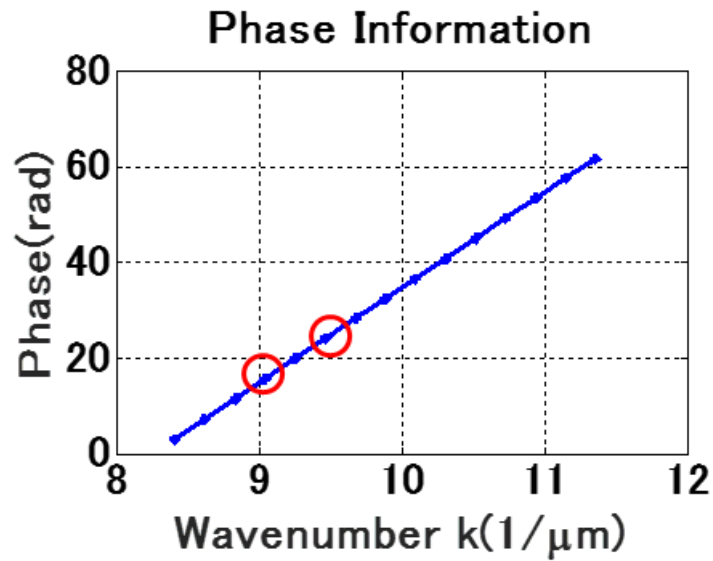
上節で、理論的に CM 法でノイズがない場合に、9nm の透明電極 ITO 膜が計測できることを説明した。ノイズ影響のため、CM 法で 9nm の透明電極 ITO 膜を計測することができなくなったこともわかった。実際、計測する時にはノイズの影響なしには不可能であるため、ノイズを除去することが必要である。次には、ノイズを除去する方法を説明する。

修士期間には、15nm の ITO 膜を解析できないために、バンドパスフィルタアルゴリズムと結び合わせて使用すると、インターフェログラムの波形が整っていないので、ウェーブフェルターを通じて、波形を整うことになる。高周波数を分離する成分と低周波成分の差のインターフェログラムはフーリエ変換してから、位相と周波数の関係曲線はフィッティングして通じて、直線になることができる。単点の膜厚が計測できるようになった。オリジナルのインターフェログラムが高周波数を分離する成分と低周波成分の差を通じて、ノイズを除去してから 15nm の膜厚の単点が計測できるようになった。このノイズを除去する方法を研究したが、薄い透明電極 ITO 膜の表面の全部点を計測することができない<sup>58)</sup>。

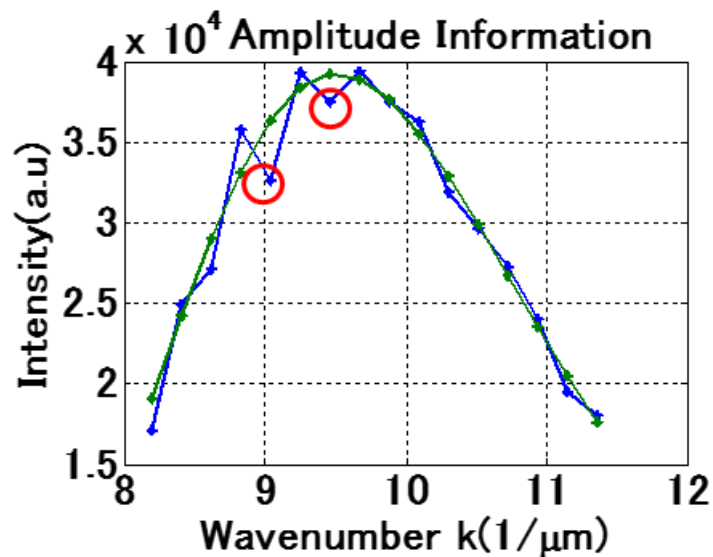
本節では、ほかのノイズを除去する方法を調べる<sup>54)</sup>。

図. 6.3 (c) のようなノイズを追加した振幅情報は、図. 6.3 (a) のような元振幅情報と比較してノイズの影響により、明らかに不安定になったことがわかる。

位相情報に基づいて透明電極 ITO 膜厚を計測する場合に、不安定データを除くために、インターフェログラムをフーリエ変換してから、得られた振幅情報と位相情報を観察する。図. 6.4 (a) に示すように、位相情報を観察して、明らかな不安定データがない。図. 6.4 (b) に示すように、振幅情報を観察すると、明らかな不安定データがある。



(a) 実際位相情報



(b) 実際の振幅情報

図. 6.4 振幅情報のフィッティング

振幅情報を観察するにより、理論の振幅情報に比べて、明らかに実際の振幅情報の線形は不安定データがある。生の振幅情報は、光源スペクトルにより 6 次多項式近似フィッティングして、図. 6.4 (b) のような緑線の振幅情報が得られた。二つの振幅情報を比較して、不安定データを除くことが可能である。

振幅情報は膜厚の影響を受けないため、試行錯誤により、その中に差値が最大の二つの点を取り除いて、図. 6.5 のような有効なデータの位相情報により、再び CM 法で透明電極 ITO 膜厚を計算する

71)。

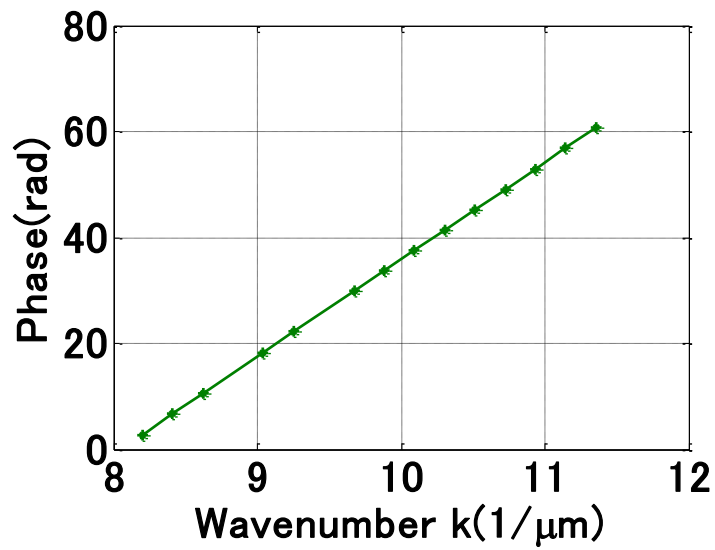


図. 6.5 有効データの位相情報

図. 6.5 のような不安定データを除去した位相情報を用いて、CM 法で透明電極 ITO 膜厚を計算する。この場合には、計測結果は図.6.6 のような透明電極 ITO 膜厚が 11nm になった。実際の場合に、ノイズ影響のため、計測結果は予測より大きくなった。

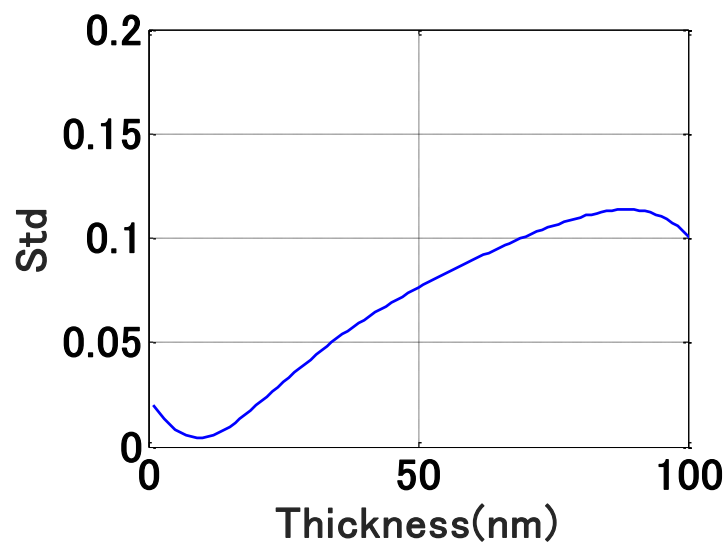
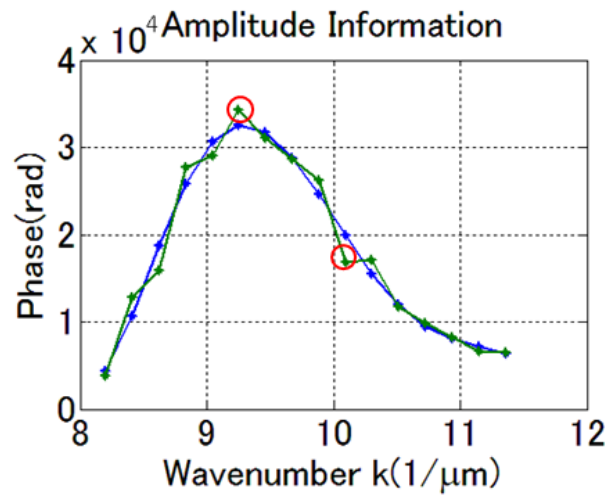


図.6.6 改良した CM 法による計測結果

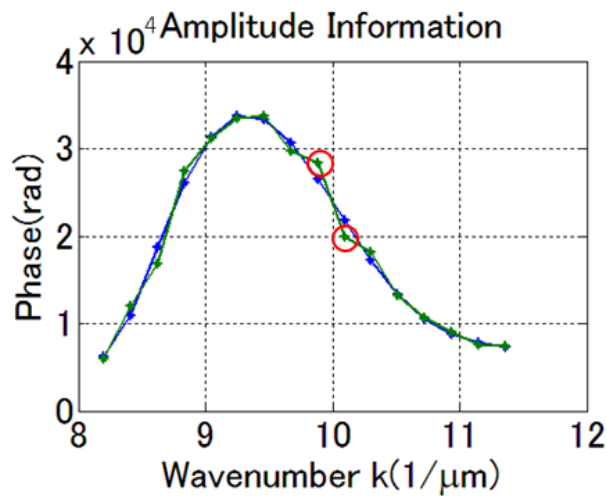
上述の不安定データを除いた過程は CM 法の改良である。次節で、改良した CM 法の正確性を検証する。

## 6.3 改良した CM 法のシミュレーション検証結果

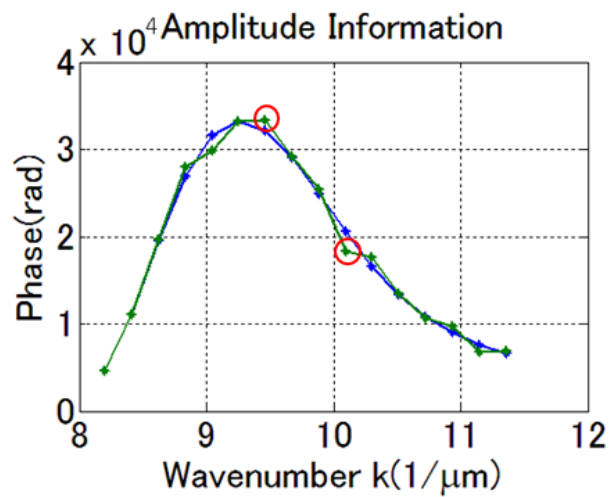
改良した CM 法の信頼できるかどうかを検証するために、サンプルの同じ場所 A に 5 回を計測した。図.6.7 に示すように、毎回の不安定データが変動している。図. 6.7 のような青い振幅情報は 6 次多項式近似フィッティングにより、不安定データを除く<sup>54)</sup>。



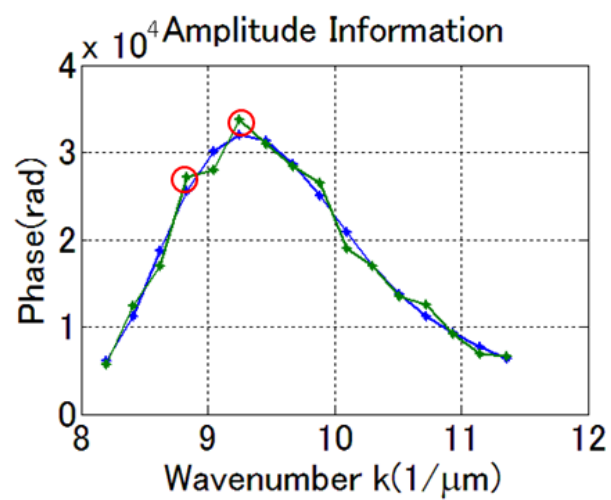
(a) 第一回の振幅情報



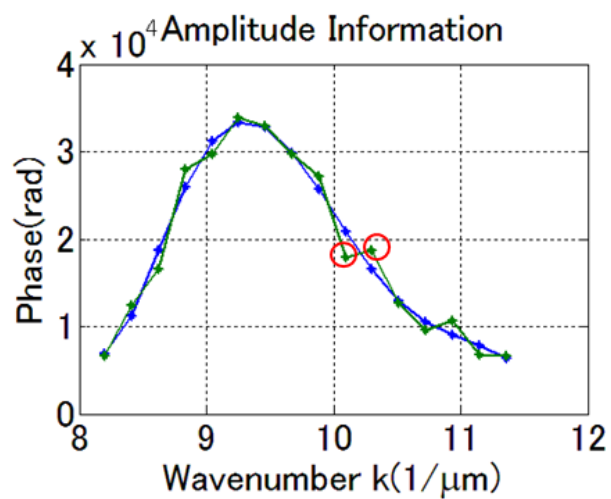
(b) 第二回の振幅情報



(c) 第三回の振幅情報



(d) 第四回の振幅情報



(d) 第五回の振幅情報

図. 6.7 五回の振幅情報

信頼できるために、できるだけ、多くのデータを使って、試行錯誤により、差値は大きい二つの不安定データを除いたら、計測結果は安定しているようにした。二つの不安定データを除いて 5 回の計測結果は表 6.2 に示される。

表 6.2 二つの不安定データを除いて 5 回の計測結果

サンプル	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5
位相情報	$\phi_{t1}(k_1)$	$\phi_{t2}(k_1)$	$\phi_{t3}(k_1)$	$\phi_{t4}(k_1)$	$\phi_{t5}(k_1)$
計測結果 $d_0(\text{nm})$	9.89	9.82	9.94	9.88	9.94

ここで、 $k_1$ は有効的なデータ、 $k$ はすべてのデータである。

5 回の計測結果の平均値は $\overline{d_0}=9.89\text{nm}$  である。

すべてのデータによる位相 $\phi_t(k)$  の 5 回の平均値 $\overline{\phi_t(k)}$ を計算することが可能である。

$$\overline{\phi_t(k)} = \frac{1}{5} [\phi_{t1}(k) + \phi_{t2}(k) + \phi_{t3}(k) + \phi_{t4}(k) + \phi_{t5}(k)] \quad (6.5)$$

この平均位相 $\overline{\phi_t(k)}$ を使って、計測結果は 9.86nm である。この二つの結果を比較して、一致していると言える。

ここまで、改良した CM 法で、一回だけ計測して、正しく計測する可能であり、計測時間が少なく、信頼できることを確認した。

改良したCM法で、透明膜の厚さを解析する流れは図.6.8に示すようになる。

開発した極めて薄い透明電極 ITO 膜厚を計算するアルゴリズム<sup>33,69)</sup>：

1. 白色干渉計による三次元データにより、一点のインターフェログラムが得られる。
2. インターフェログラムをフーリエ変換してから、振幅情報と位相情報が得られる。
3. 振幅情報により、有効な位相 $\phi_D$ を抽出する。
4. Matlab ソフトウェアを利用して、線形フィッティングを通じて、光路差から引き起こす線形部分の位相 $\phi_L$ が求められる。
5. 総位相情報の中にこの線形部分の位相情報を除いて、実際に透明電極 ITO 膜の膜内部の反射による非線形部分の位相情報が得られた。
6. 同様に Matlab ソフトウェアを利用して、透明電極の膜内部の異なる膜厚のために、一連の反射による非線形部分の位相情報のモデルをたてることが可能である。
7. 実際の位相は計算した一連の理論的な位相モデルと一つずつ照合して、曲線類似性により、それぞれのデータの標準偏差を求めて、その中で最小値を持つ膜厚がサンプルの膜厚である。
8. このようにして、すべて面上の点を計測して、サンプルの膜厚の三次元分布が得られた。

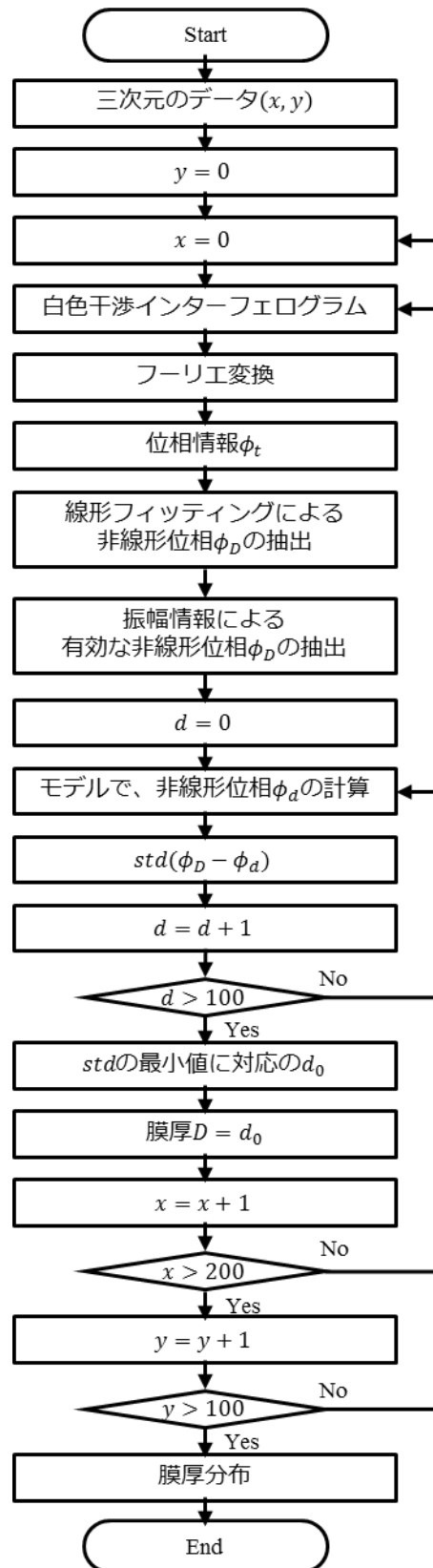


図.6.8 改良した CM 法で解析のフローチャート

## 第七章

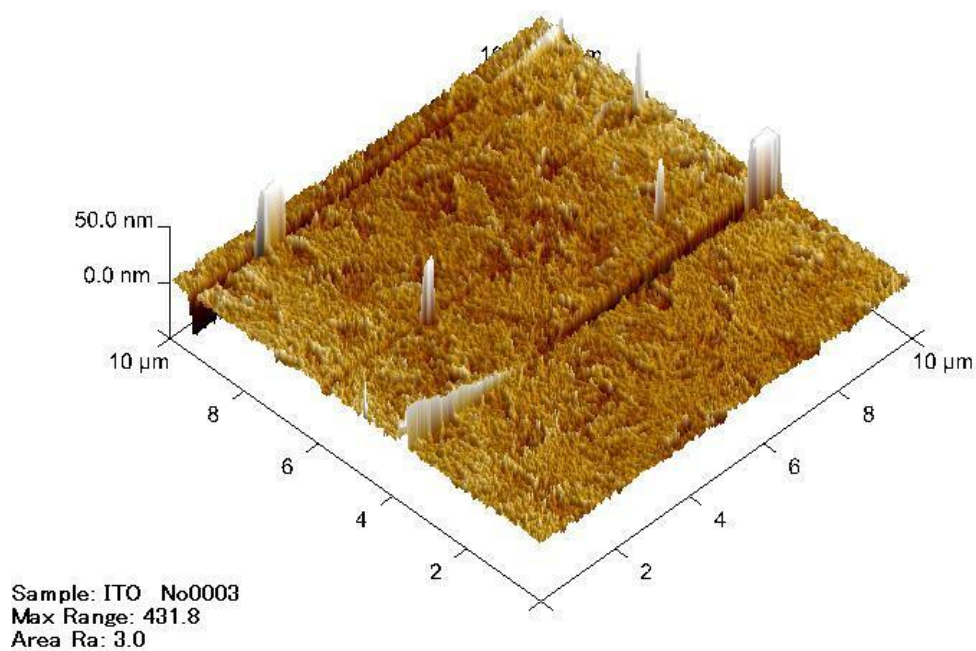
### 実験の計測結果

本章では、本研究で行われる干渉実験の計測結果を述べる。実験の目的にあった計測を行うために、ここで CM 法の開発と改良により、極めて薄い透明電極 ITO 膜厚を計測することになる。

#### 7.1 90nm の透明電極 ITO 膜の計測結果

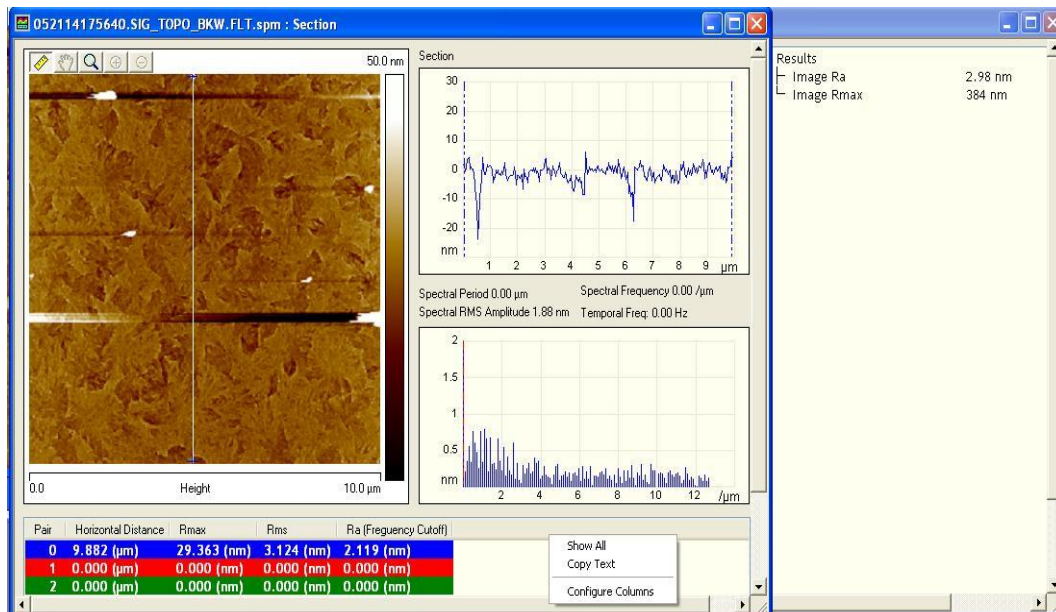
##### 7.1.1 実験用のサンプルの仕様

実験用の 90nm のサンプルはジオマテック株式会社製の透明電極 ITO 膜である。サンプルの仕様は、メーカーから、図.7.1 のように示される。



(a) 三次元分布





(b) 表面分析

図.7.1 90nm の透明電極 ITO 膜の仕様  
(ジオマテックより提供いただいた)

表 7.1 はメーカーから 90nm サンプルの表面粗さが各計測領域に計測結果である。表 7.1 により、計測領域は大きくに従って、表面粗さ Ra は大きくなることが分かった。

表 7.1 メーカーから 90nm サンプルの表面粗さ

計測領域	3μm		5μm		10μm		20μm	
Ra(nm)	Ra	Max Range	Ra	Max Range	Ra	Max Range	Ra	Max Range
1	1.8	26.8	2.0	127.0	3.0	431.8	4.8	371.0
2	1.9	27.4	2.0	51.4	2.6	66.6	5.6	71.9

実験用サンプルの透明電極膜は指示の膜厚が  $90\text{nm} \pm 20\text{nm}$  であり、屈折率が 2.15 である。空気の屈折率が 1 だと仮定して、ガラス基板の屈折率は 1.51 である<sup>48,55,73)</sup>。

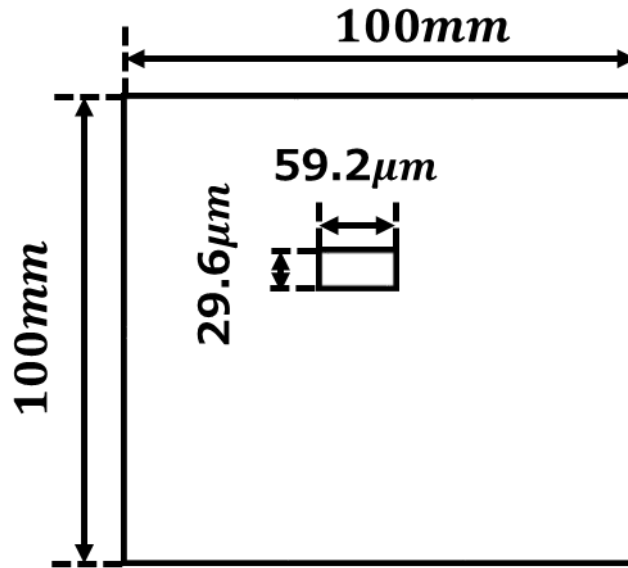


図.7.2 90nm の透明電極 ITO 膜の見取り図

図.7.2 に示すように、実験用のサンプルは長さが 100mm であり、実験の場合に 200×100 pixel のデータを取られる。対物レンズにより、1pixel=7.4μm/25=0.296μm であり、200 pixel=59.2μm である。

表 7.2 サンプルの計測報告書

スパッタリング物質	計測項目	計測方法	指示値	実測値
ITO	シート抵抗	デジタルテスター	30Ω/sq 以下	14.4-17.5Ω/sq
	膜厚	表面粗さ計	90nm±20nm	85.1-91.7nm
	分光透過率	分光光度計	78% ≤ (550nm)	

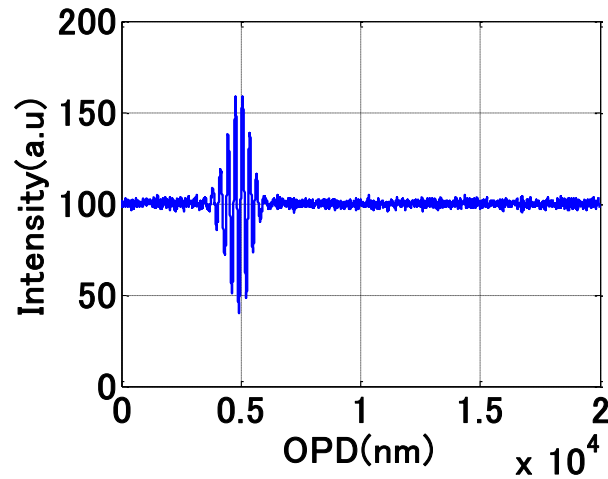
### 7.1.2 90nm の透明電極 ITO 膜厚の三次元計測結果

本文は開発する位相情報により膜厚を計算するカーブマッチング法（CM 法）：透明電極 ITO 膜の表面の一点を例として説明する<sup>48)</sup>。

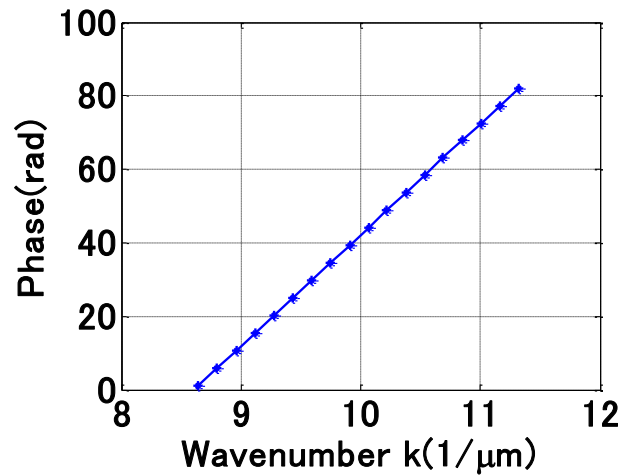
1. CCD カメラでサンプルの表面上にこの点で、図.7.3 (a) のようなインターフェログラムを得て、このインターフェログラムをフーリエ変換してから、得られた位相情報は図.7.3 (b) のように示す。
2. MatLab ソフトウェアで位相情報の線形フィッティングを通じて、光路差から引き起こす位相情報が求められて、この位相は図.7.3 (c) のような線形関係になる。
3. 総位相 $\phi_t$ の中にこの線形部分の位相情報を除いて、透明電極 ITO 膜の膜内部の反射による位相変化 $\phi_D$ を求めることができ、図.7.3 (d) の青線のように示す。
4. 同様に MatLab ソフトウェアを利用して、透明電極の膜内部の異なる膜厚のために、一連の反射による位相変化 $\phi_a$ のモデルをたてることができ、図.7.3 (d) の赤線のように示す（膜厚が 96nm である）。

5. 実際の位相 $\phi_D$ は一連の理論的な位相モデル $\phi_a$ と一つずつ照合して、それぞれのデータの標準偏差を求めて、その中に最小値の対応する膜厚はサンプルの膜厚である。図.7.3 (e) のように示し、指示の膜厚が  $90\text{nm} \pm 20\text{nm}$  である透明膜の計測結果は  $96\text{nm}$  である。

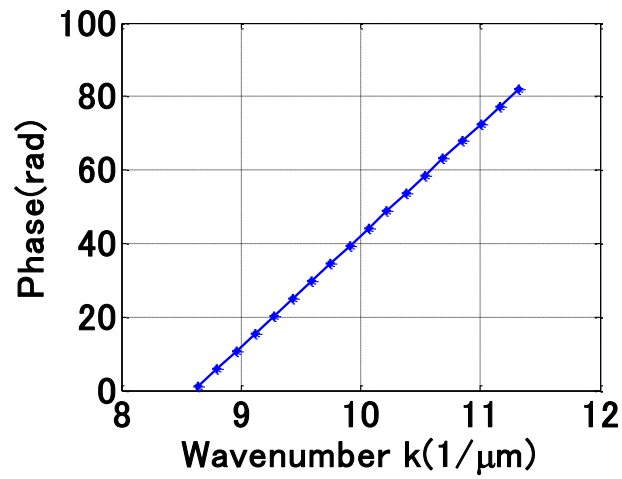
計測結果は指示の膜厚と一致しているため、開発した CM 法により、位相情報だけ分析すると透明電極 ITO 膜厚さが求められることが分かった。



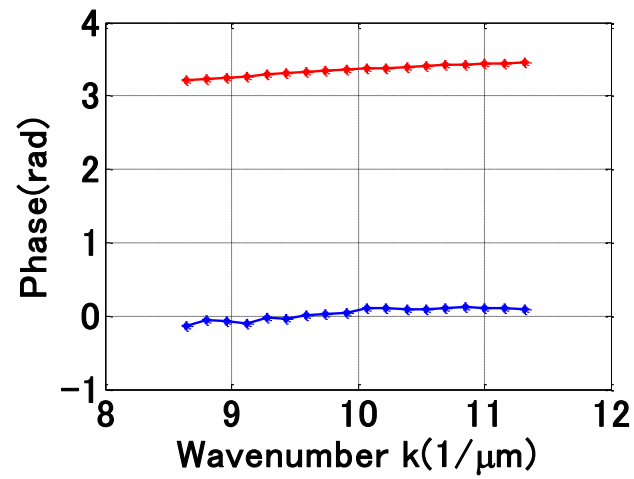
(a) インターフェログラム



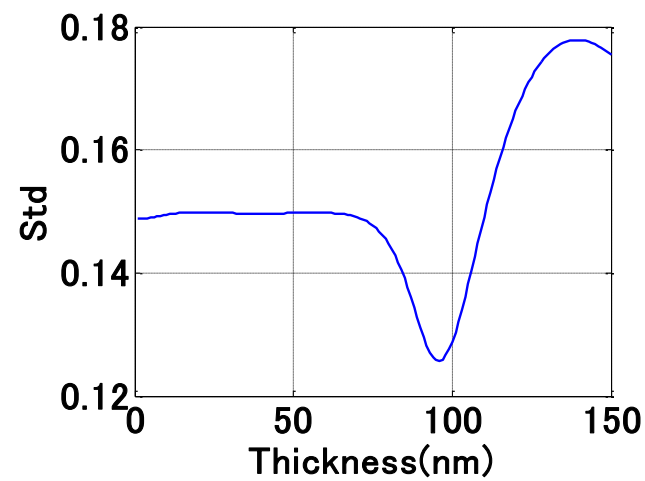
(b) 位相情報



(c) 線形フィッティング



(d) 実際位相 $\phi_D$  (青線)、理論位相 $\phi_d$  (赤線)



(e) 標準偏差による膜厚の計算結果

図.7.3 開発した CM 法による膜厚の計測結果

上述により、図.7.4 に示すように、CM 法の流れにより、100nm 以下の透明電極 ITO 膜厚が計測できた。

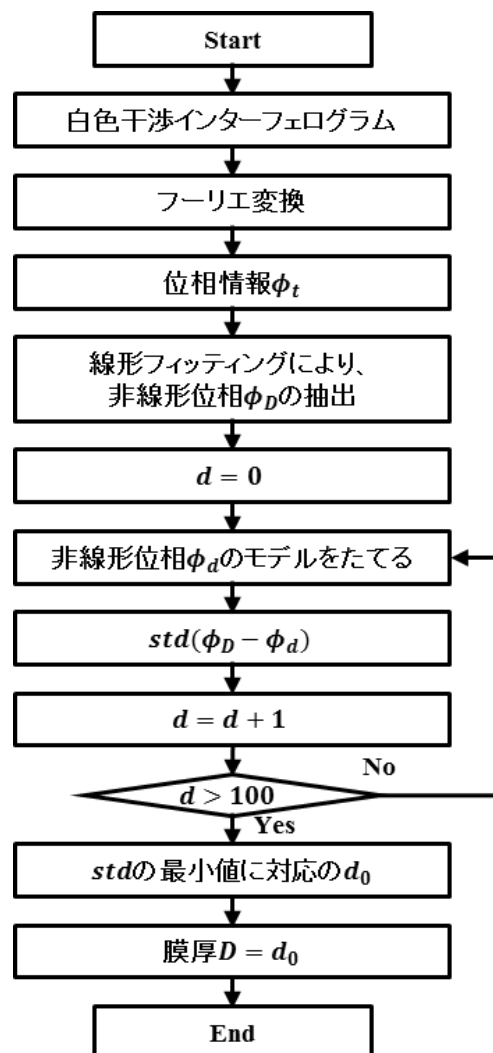
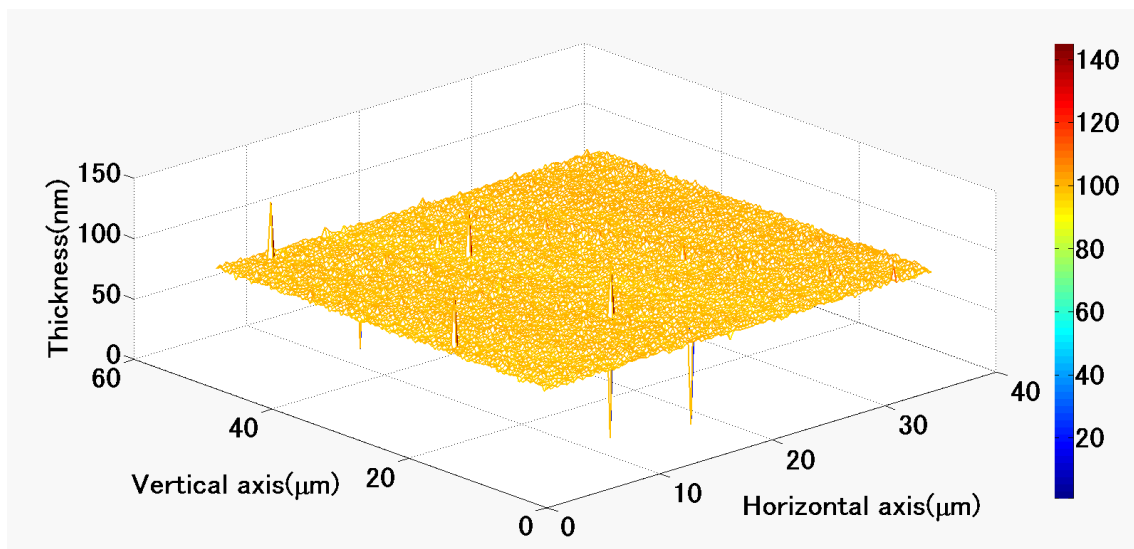


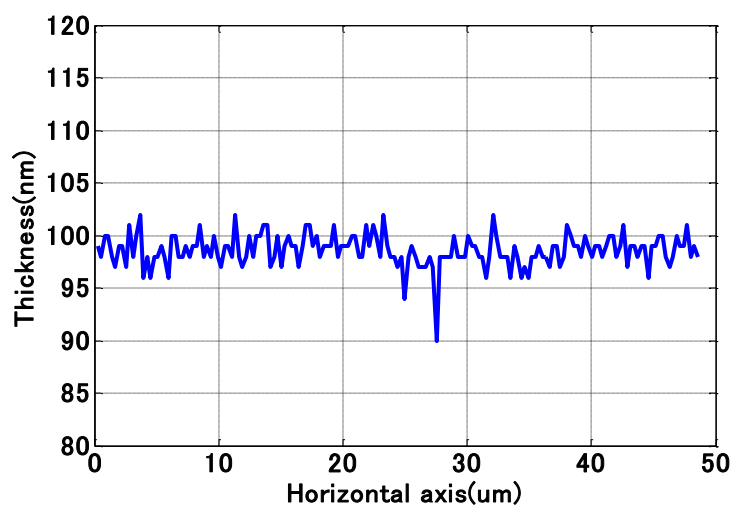
図.7.4 CM 法のフローチャート（一点）

開発した CM 法により、透明電極 ITO 膜の表面の観測点 A の計測結果は 96nm である。この点から透明電極 ITO 膜の表面に全部点を計測するまでに広げて、図.7.5 (a) のようなサンプルの膜厚の三次元分布が得られた。

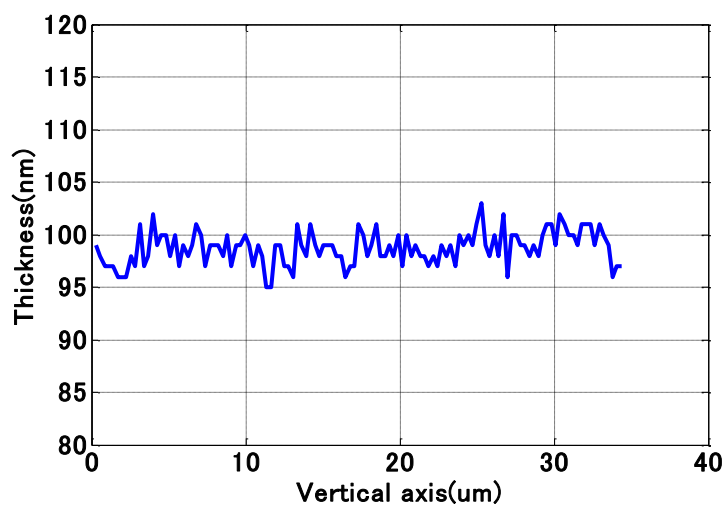
図. 7.5 (b) のような計測結果の横軸断面図のと図.7.5 (c) のような縦軸断面図からみると、被計測サンプルの表面上の計測膜厚はおおよそ 90nm と 104nm の間に分布していて、この計測結果はサンプルの標準膜厚の実測値より大きくても、指示値  $90\text{nm} \pm 20\text{nm}$  と一致しているといえる。<sup>33)</sup>



(a) 透明電極 ITO 膜厚の三次元分布



(b) 横軸の断面図



(c) 縦軸の断面図

図. 7.5 CM 法による 90nm の透明電極 ITO 膜の計測結果

表 7.3 で、CM 法により、90nm の透明電極 ITO 膜の計測結果のまとめである。

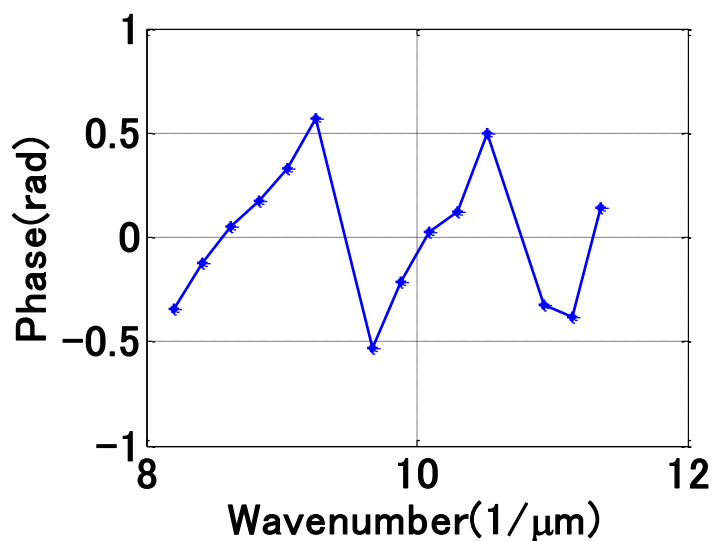
表 7.3 CM 法による 90nm の透明電極 ITO 膜の計測結果

	横軸の断面図(nm)	縦軸の断面図(nm)
最小値	90	95
最大値	102	103
平均値	99	99
標準偏差	1.505	1.594

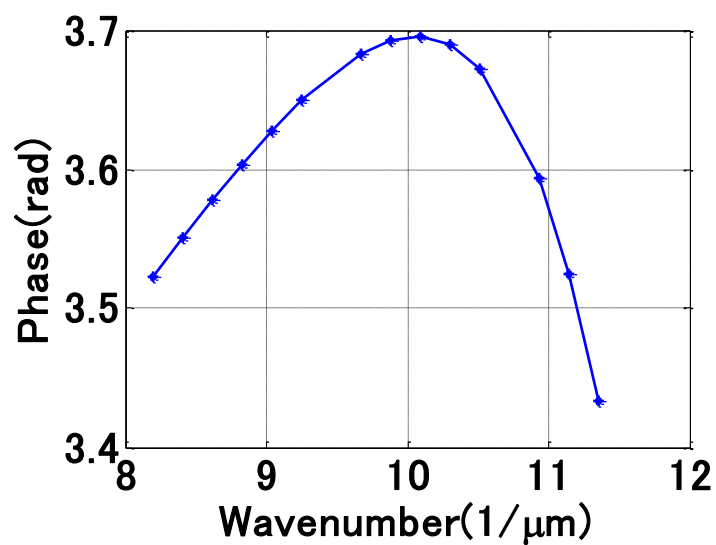
ここまで、CM 法により、90nm の透明電極 ITO 膜厚を計測することが可能である。次に、改良した CM 法により、90nm の透明電極 ITO 膜の計測結果はどのような変化することを確認する。

改良した CM 法<sup>54)</sup>：

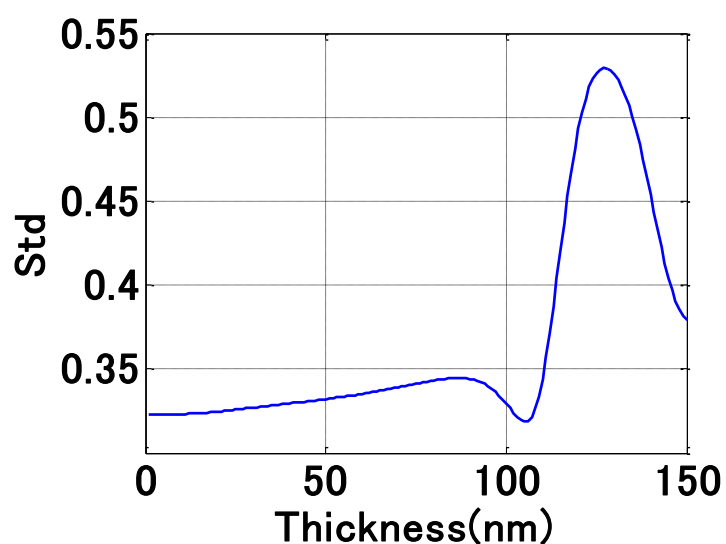
1. 振幅情報により、有効な位相情報を抽出する。
2. 有効な位相 $\phi_t$ の中に線形部分の位相情報を除いて、透明電極 ITO 膜の膜内部の有効なデータの反射による位相変化 $\phi_D$ が求められて、図.7.6 (a) のように示す。
3. 有効なデータの一連の反射による位相変化 $\phi_d$ のモデルをたてることができ、図.7.6 (b) の赤線のように示す（膜厚が 96nm である）。
4. 実際の位相 $\phi_D$ は一連の理論的な位相モデル $\phi_d$ と一つずつ照合して、それぞれのデータの標準偏差を求めて、図.7.6 (c) に最小値の対応する膜厚（105nm）はサンプルの膜厚である。



(a) 有効なデータの反射による位相変化 $\phi_D$



(b) 有効なデータの一連の反射による位相変化 $\phi_d$

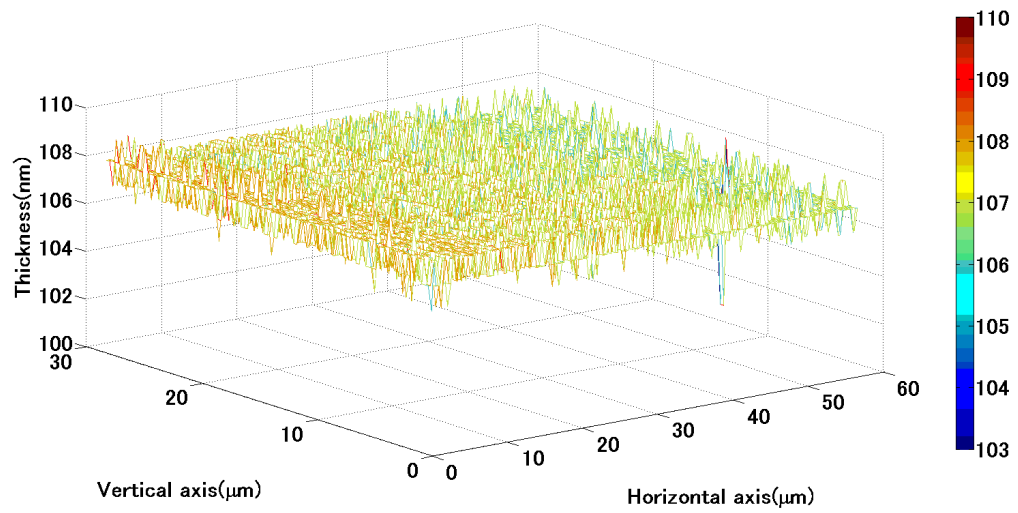


(c) 標準偏差による膜厚の計測結果

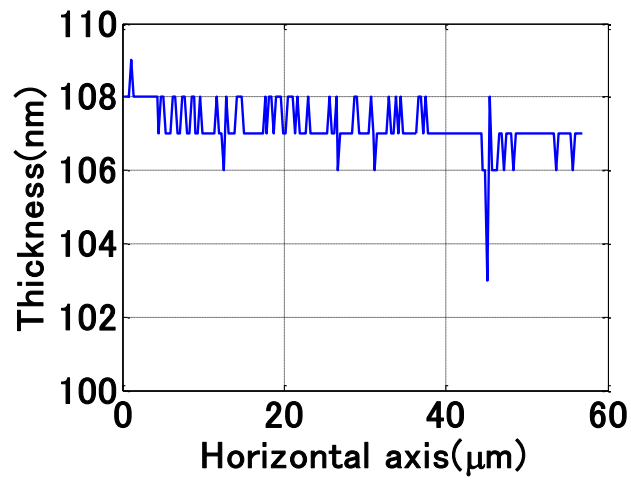
図.7.6 改良した CM 法による膜厚の計測結果

この点から透明電極膜の表面に全部点を測量するまでに広げることができて、図.7.7 (a) のようなサンプルの膜厚の三次元分布が得られた。図.7.7 (b) のような計測結果の横軸断面図と図.7.7 (c) のような縦軸断面図からみると、被計測サンプルの表面上の計測膜厚はおおよそ 103nm と 109nm の間に分布していて、この計測結果は開発した CM 法による計測結果より大きくなったが、安定性が向上になった。

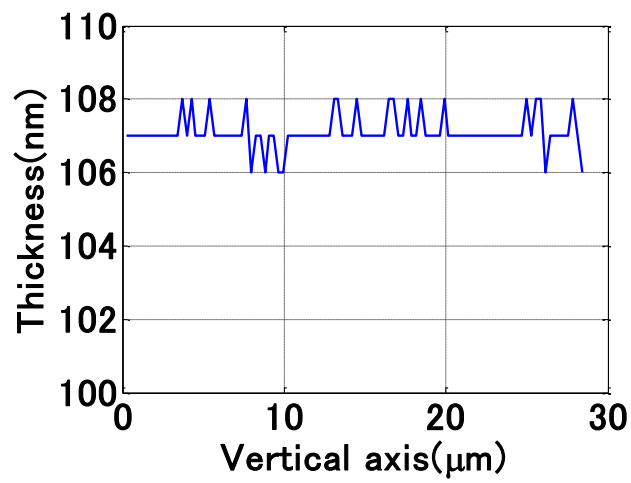




(a) 透明電極 ITO 膜厚の三次元分布



(b) 横軸の断面図



(c) 縦軸の断面図

図. 7.7 改良した CM 法による 90nm の透明電極 ITO 膜の計測結果

表 7.4 で、改良した CM 法により、90nm の透明電極 ITO 膜の計測結果のまとめである。

表 7.4 改良した CM 法による 90nm の透明電極 ITO 膜の計測結果

	横軸の断面図(nm)	縦軸の断面図(nm)
最小値	103	106
最大値	109	108
平均値	107	107
標準偏差	0.6186	0.4606

ここまで、CM 法と改良した CM 法により、90nm の透明電極 ITO 膜厚を計測することを確認した。

### 7.1.3 光源スペクトル分布の影響

一般的に、膜厚の計測結果は使用光源のスペクトル分布と関係がある。光源のスペクトル分布は膜厚の測量結果に対する影響を検証するために、以下に計測結果により、光源のスペクトル分布と膜厚に対して計測精度と再現度を検証する。

図.3.4 に示すように、上述にすべての光源スペクトルは長い波長の範囲で強度が強いため、安定性はよいことがわかった。白色光波長の光源スペクトルを使用する時に、データ量は多いため、たとえ少数の誤差点を発生しても、計測結果の安定性に対して影響がある。

10 チームに対して膜厚が同じサンプルの同じ点に、上述の改良した CM 法で計測を行って、光源のスペクトルは白色光の波長範囲(384～768nm)と短い波長範囲(389～526nm)と長い波長範囲(564～786nm)場合に、膜厚の計測結果は表 7.5 のように示す。

表 7.5 光源のスペクトルを考慮する膜厚の計測結果

	計測結果（単位：nm）		
計測点	短い波長範囲	長い波長範囲	すべての波長範囲
No.1	76	108	81
No.2	76	108	81
No.3	75	107	82
No.4	75	107	82
No.5	84	107	85
No.6	75	107	81
No.7	76	108	80
No.8	75	107	80
No.9	79	107	84
No.10	75	107	81
最大値	84	108	85
最小値	75	107	80
平均値	77	107	82
標準偏差	2.7276	0.4583	1.5524

表 7.5 により、膜厚は 90nm である場合に、短い波長範囲で、標準偏差が一番大きく、安定性は悪い。長い波長範囲で、標準偏差が一番小さく、安定性はよいことが分かった。すべての白色光波長範囲で、安定性はよくなる。したがって、安定性のため、長い波長範囲で使用に決定した。

ここまで、FDA アルゴリズムに基づいて、CM 法を開発して、有効に非常に薄い透明電極 ITO 膜の表面の膜厚分布が計測できる。CM 法は線形フィッティングの方法を利用して、インターフェログラムをフーリエ変換する後に位相情報の中に、有効に反射による位相情報を抽出して、実験の位相情報と理論的な位相情報のモデルと照合して、曲線類似性により、一番小さい標準偏差を求めると、90nm±20nm の非常に薄い透明電極 ITO 膜厚を計測できるようになった。

次節に、更に改良した CM 法により、100nm 以下の膜厚が計測できるかどうか検討を行う。

## 7.2 9nm の透明電極 ITO 膜の計測結果

### 7.2.1 実験用のサンプルの仕様

開発した CM 法では、90nm の透明電極 ITO 膜が計測できる。本節では、100nm 以下の膜厚が計測できるかどうか検討を行う。極めて薄い透明電極 ITO 膜厚を計測するアルゴリズムの開発を行う<sup>69)</sup>。

9nm のサンプルはジオマテック株式会社製の透明電極 ITO 膜である。9nm サンプルの膜付きと膜無しの計測結果は図.7.8 と図.7.9 のように示す。メーカーから 5μm の計測領域に 9nm サンプルの表面粗さ

Ra は 0.1901nm であり、ガラスの表面粗さ Ra は 0.1463nm である。

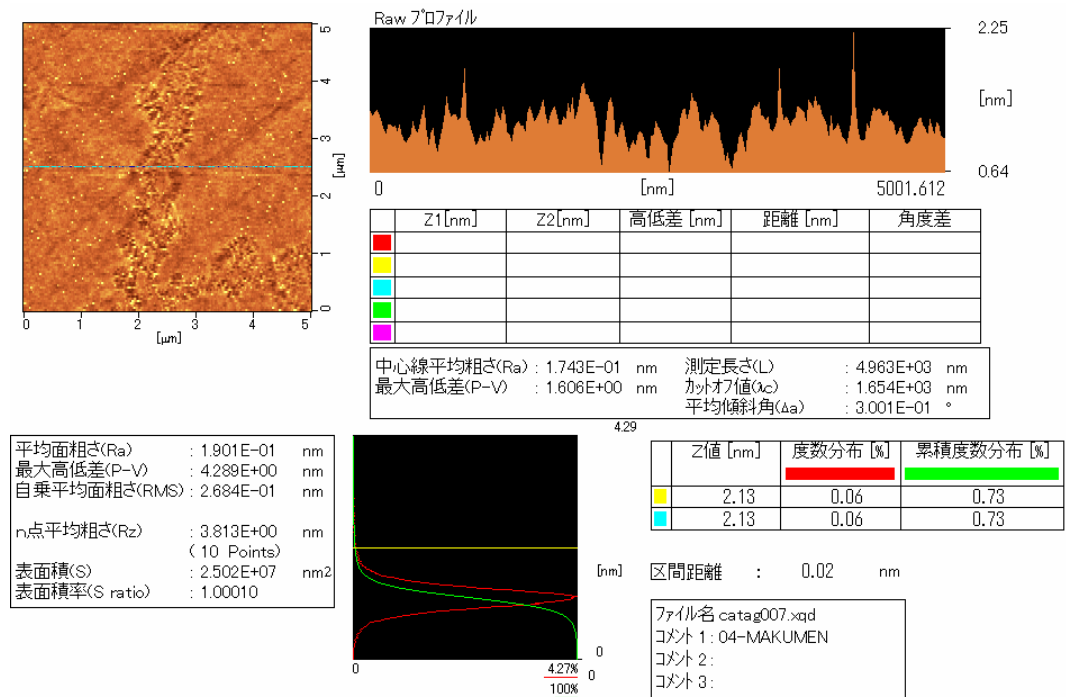


図.7.8 メーカーから 9nm サンプルの膜付きの計測結果  
(ジオマテックより提供いただいた)

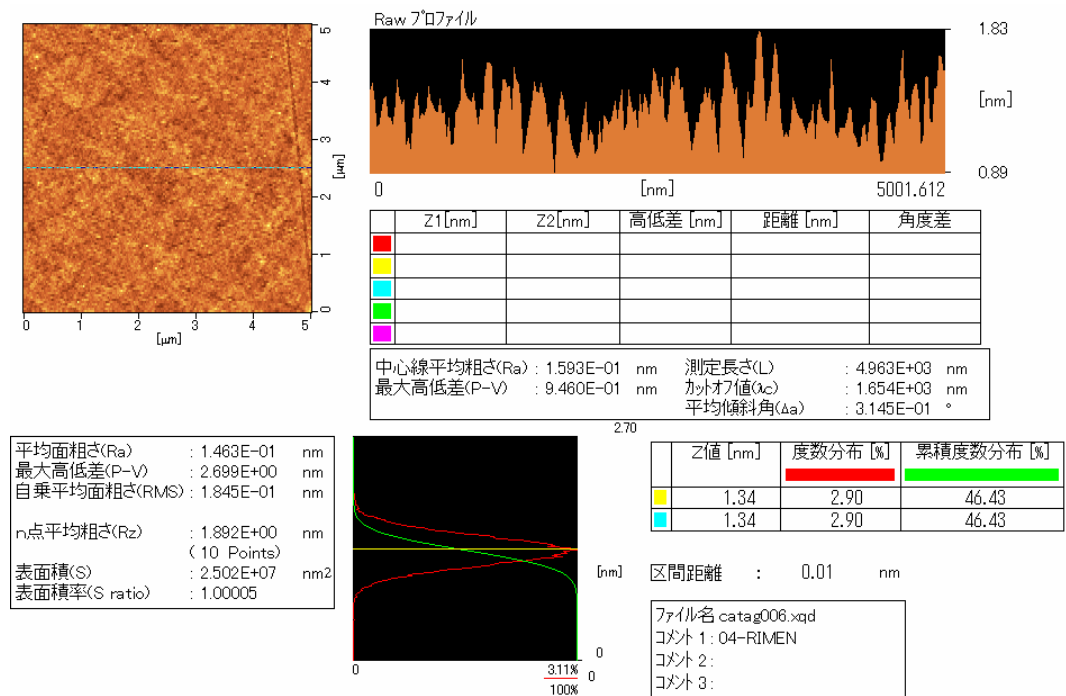


図.7.9 メーカーから 9nm サンプルの膜無しの計測結果  
(ジオマテックより提供いただいた)

本節では、実験用サンプルの透明電極膜は指示の膜厚が 9nm であり、屈折率が 2.15 である。空気の屈折率が 1 だと仮定して、ガラス基板の屈折率は 1.51 である。実験用は 50×の Mirau 型対物レンズであるため、1pixel=296nm。本研究用のサンプルサイズは図.7.10 のような 100mm×100mm であり、実験する時に 59.6μm×59.6μm 範囲のデータを計測する。

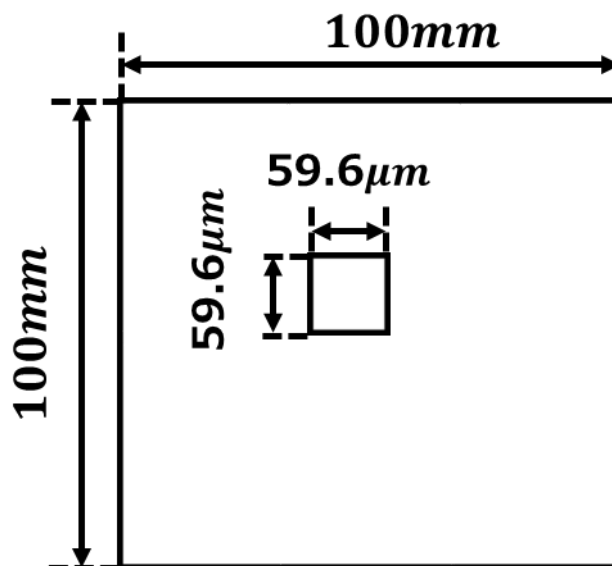


図.7.10 9nm の透明電極 ITO 膜の見取り図

表 7.6 はサンプルの計測報告書である。

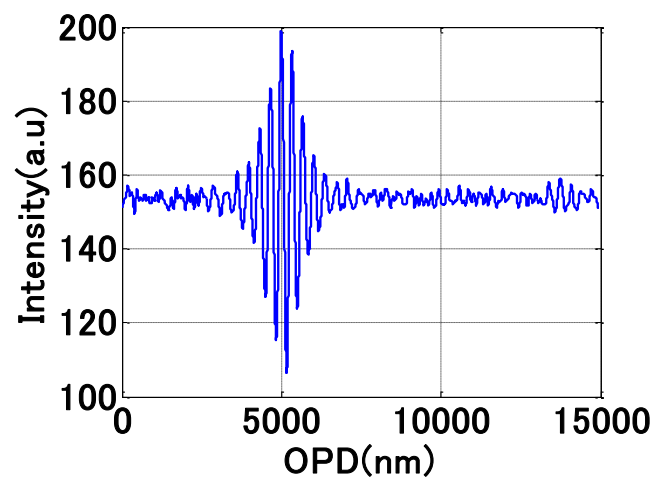
改良した CM 法は、同じ手順により、実際に 9nm の透明電極 ITO 膜が計測できるかどうかと検証する。

表 7.6 サンプルの計測報告書

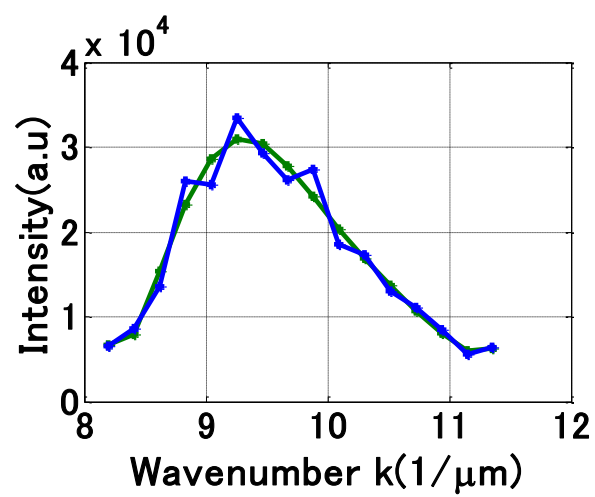
スパッタリング物質	計測項目	計測方法	指示値	実測値
ITO	シート抵抗	デジタルテスター	500-1000 Ω/sq 以下	528-684Ω/sq
	膜厚	表面粗さ計	9nm	6.7-7.4nm
	分光透過率	分光光度計	86% ≤ (550nm)	

## 7.2.2 9nm の透明電極 ITO 膜厚の三次元計測結果

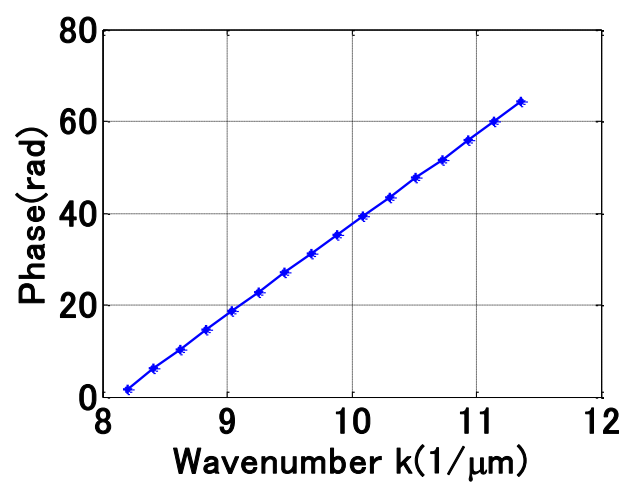
本研究は前項研究に基づき、透明電極膜 ITO の膜厚を計測する最適化の CM 法を提出した。図.7.11 に示すように、図.7.11 (b) のような振幅情報によりノイズがあるための生成した不安定データを除去する。図.7.11 (d) のような残った有効データの位相情報により、線形フィッティングを通じて線形部分の位相情報を除去し、図.7.11 (e) の青い線のような膜内部の反射による非線形部分の位相情報が得られた。この非線形位相情報は図.7.11 (e) の赤い線のような理論的な非線形位相情報のモデルと一つずつ照合して、曲線類似性により、それぞれの標準偏差を求めると、図.7.11 (f) のような最小の標準偏差が対応の膜厚はサンプルの透明電極膜 ITO の膜厚である。



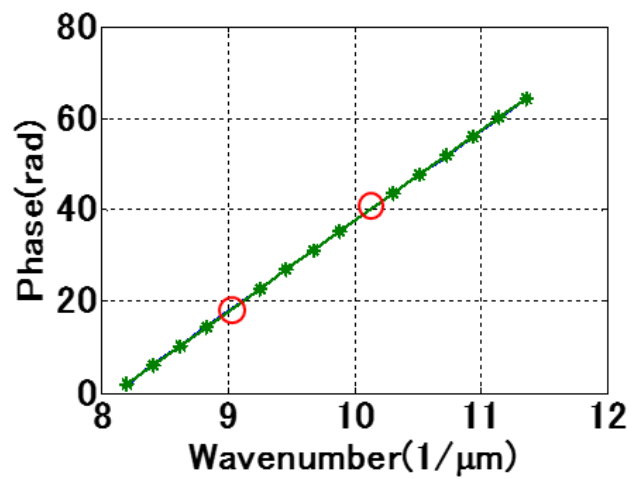
(a) インターフェログラム



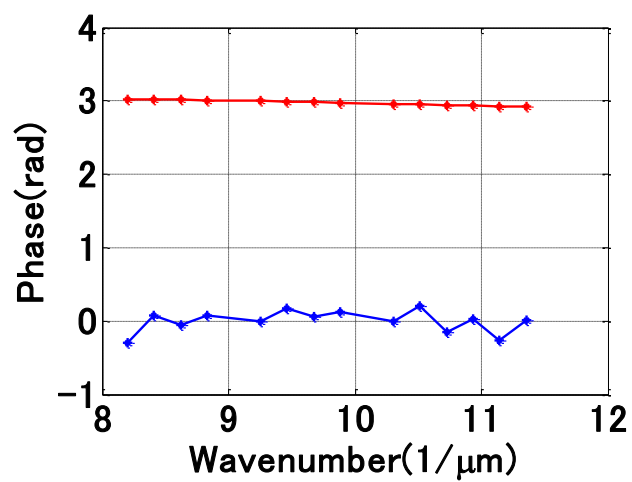
(b) 振幅情報



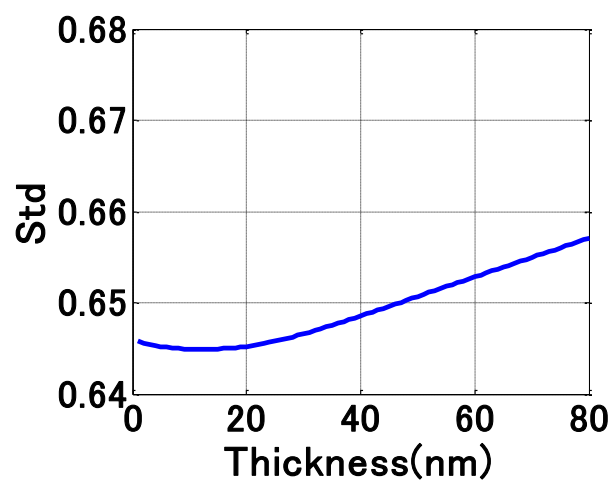
(c) 位相情報



(d) 線形フィッティング



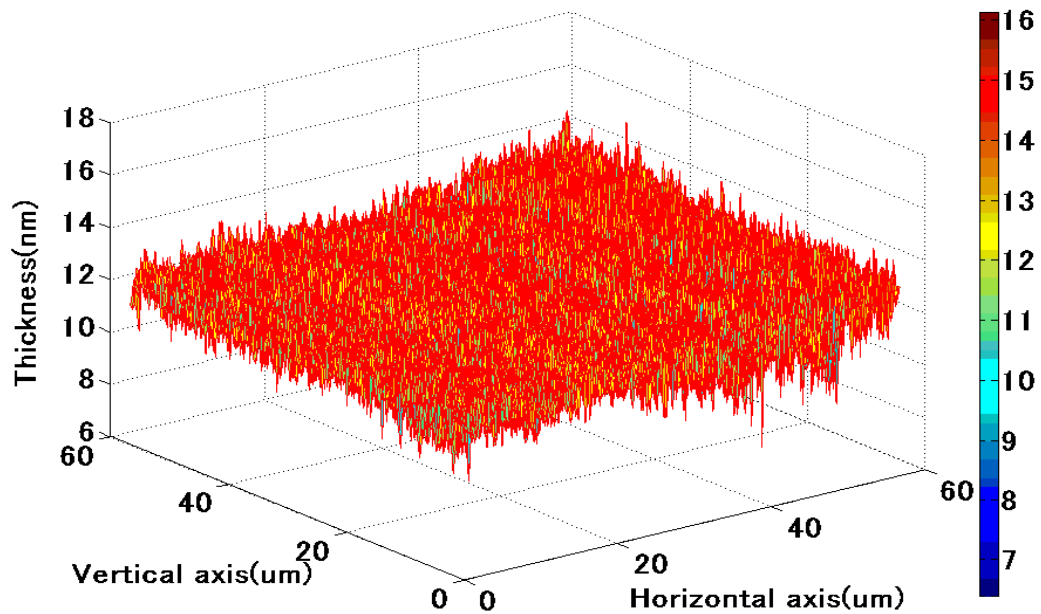
(e) 実際位相 $\phi_D$  (青線)、理論位相 $\phi_d$  (赤線)



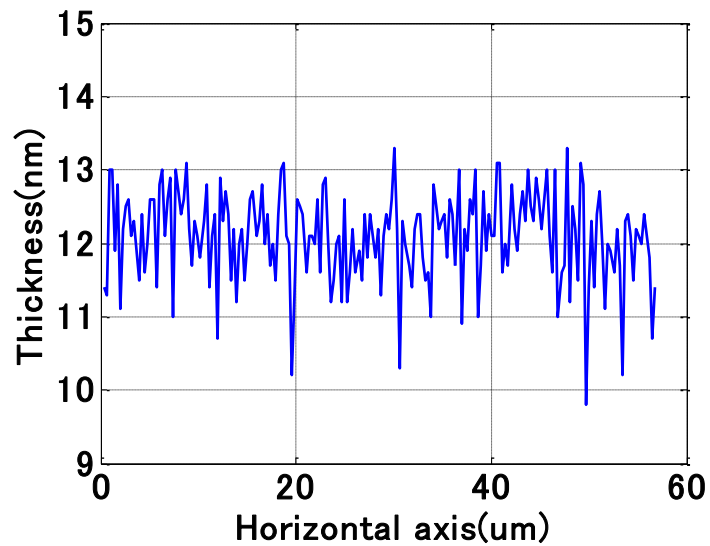
(f) 標準偏差を用いて膜厚の計算結果

図.7.11 改良した CM 法により膜厚を計測する

一つの観測点から、全体の透明電極 TIO 膜の表面に拡張でき、図.7.12 (a) のように示す透明電極 ITO 膜表面の三次元分布の情報が計測できた。ここで、屈折率を考慮しなくて、計測精度は 0.1nm であり、計測結果の横軸と縦軸の断面図をみると膜厚の分布はおおよそ 10nm~15nm の範囲にあり、指示値と一致しているといえる。

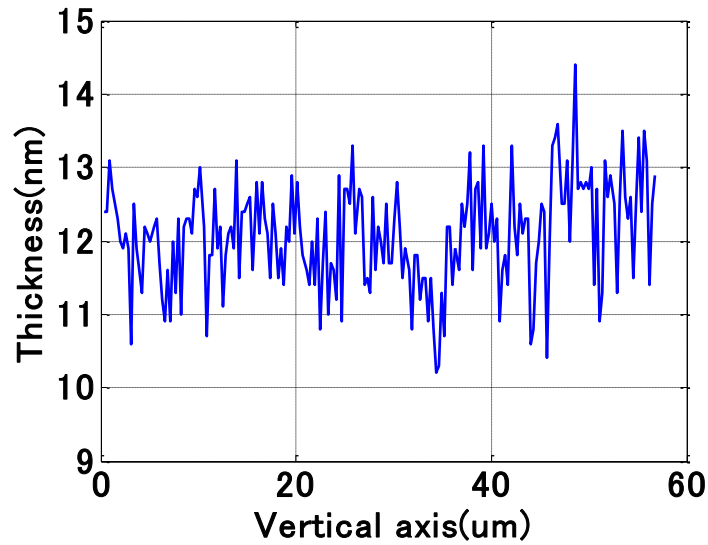


(a) 透明電極 ITO 膜厚の三次元分布



(b) 横軸断面図





(c) 縦軸断面図

図.7.12 90nm の透明電極 ITO 膜の計測結果

表 7.7 で、改良した CM 法による 9nm の透明電極 ITO 膜の計測結果のまとめである。

表 7.7 改良した CM 法による 9nm の透明電極 ITO 膜の計測結果

	横軸の断面図(nm)	縦軸の断面図(nm)
最小値	9.8	10.2
最大値	13.3	14.4
平均値	12.1	12.8
標準偏差	0.6206	0.7101

この計測結果は指示膜厚の実測値より、少量大きいことがわかる。さらなる精確な計測結果を求めるために、何か計測結果に影響するパラメータがあるかどうか考える必要である。次には、計測精度の向上を説明する。

## 7.3 計測精度の向上

透明電極 ITO 膜厚を計測するには屈折率と開口数 NA が非常に重要なパラメータである。本研究では、理論的非線形位相を計算する時に反射係数により、この位相は屈折率の影響を受けている。この前の研究において、解析する場合に ITO 膜サンプルの屈折率は 2.15 と仮定して使用していた。実際には、ITO 膜の屈折率は波長にしたがって、変化している。ここでは、屈折率分散と開口数 NA を考慮する上で、計測を行う。

### 7.3.1 異なる屈折率分散による計測結果の変化

屈折率とは、真空中の光速を物質中の光速で割った値であり、物質中での光の進み方を記述する上での指標である。真空を 1 とした物質固有の値を絶対屈折率、二つの物質の絶対屈折率の比を相対屈折率と呼んで区別する場合もある。

透明膜の内部の理論的な反射による位相変化 $\phi_d(k, n_2, d)$ が求められる。この反射による位相変化 $\phi_d$ はサンプル ITO 膜の屈折率に依存している。したがって、位相変化 $\phi_d$ のモデルをたてる時に、ITO 膜の屈折率分散を考慮することが必要である。

実験結果の結論を説明するため、シミュレーションを行ってみる。

シミュレーションの初期条件は、膜厚が 10nm であり、屈折率分散を考慮する。膜厚さ 10nm の位相分布にノイズを加えて、改良した CM 法を利用し、膜厚さを解析することが図.7.13 のように示される。

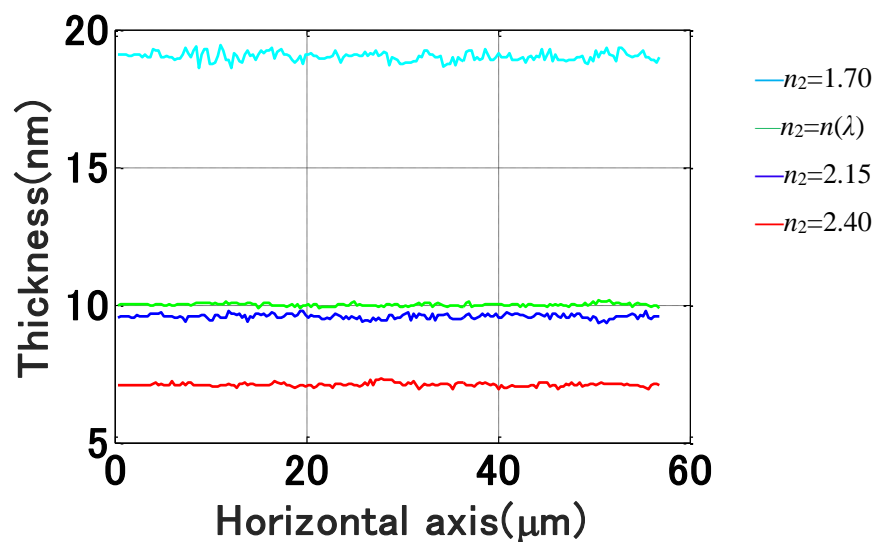


図.7.13 シミュレーション結果

表 7.8 のような四種類のモデル位相分布に対して、解析された膜厚さも異なる。

シミュレーション結果により、実験結果の結論を検証した。屈折率が大きいほど、計測結果が小さく、標準偏差が小さい。屈折率分散を考慮すると、さらなる精確なモデルをたてたため、計測結果は精確になって、安定性も向上になった。

表 7.8 シミュレーション結果

屈折率	1.70	2.15	2.40	$n(\lambda)$
最小値/nm	18.60	9.32	6.92	9.87
最大値/nm	19.44	9.78	7.32	10.15
平均値/nm	19.02	9.58	7.10	10.01
範囲/nm	0.84	0.46	0.40	0.28
標準偏差	0.1589	0.0829	0.0680	0.0483

次には、異なる屈折率分散によって、計測結果の変化を説明する。

中心波長の屈折率の値が変わらなくて、屈折率分散の範囲が倍数で変化する。計測結果はどのように変化することを確認する。

図.7.14 に示すように、式 7.1 により、屈折率分散を変化した。

$$n_a(\lambda) = a \times [n(\lambda) - n(\lambda_1)] + n(\lambda_1) \quad (7.1)$$

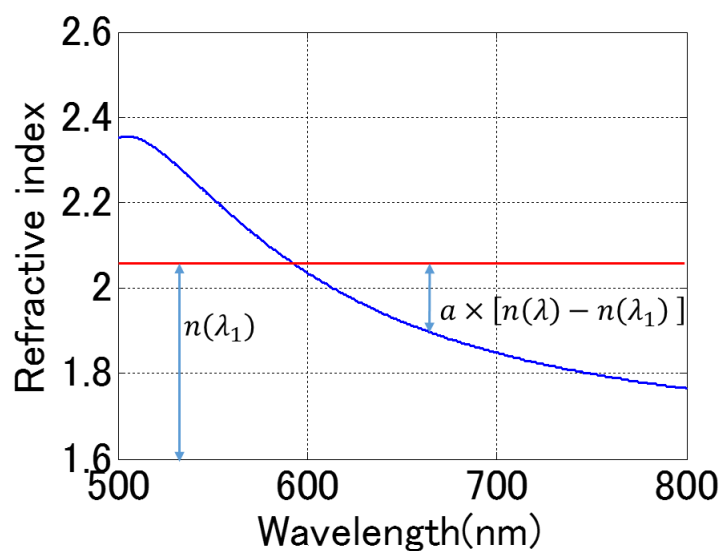
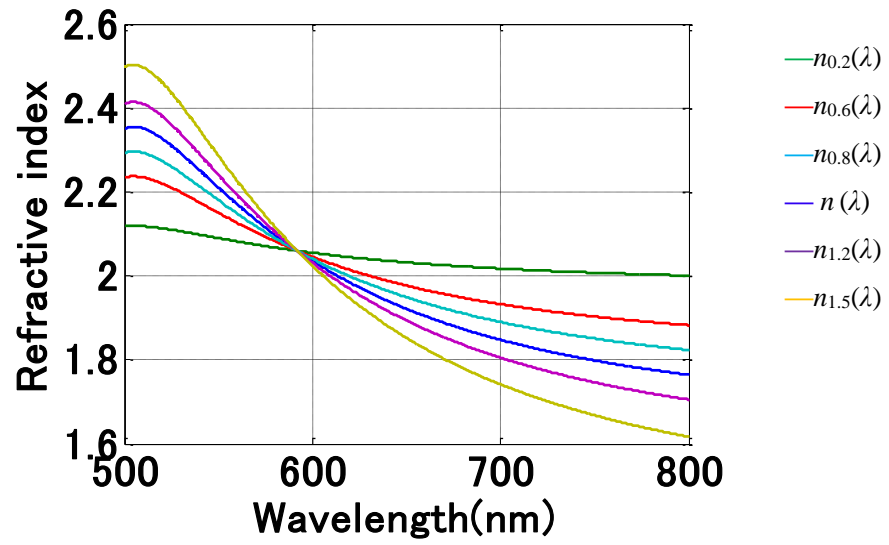
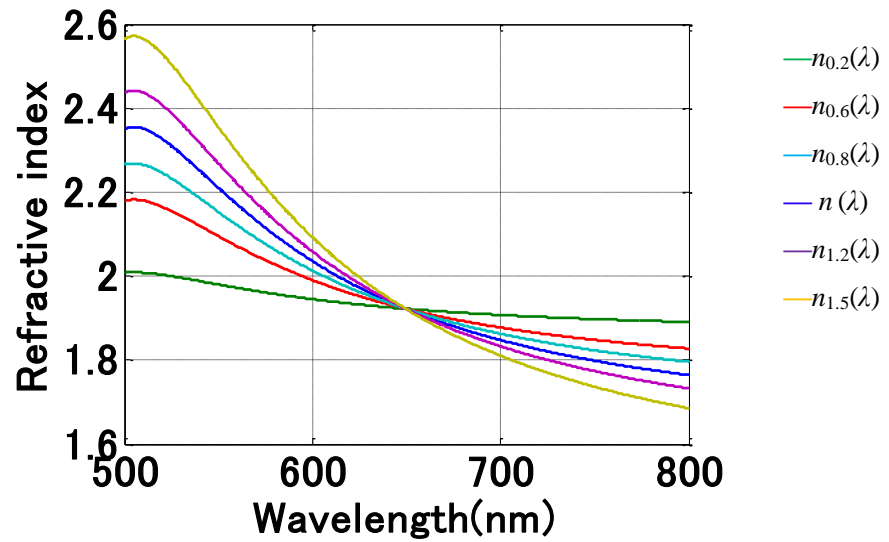


図.7.14 屈折率分散の変化

異なる $n(\lambda_1)$ は異なる屈折率分散があり、図.7.15 のように示す。



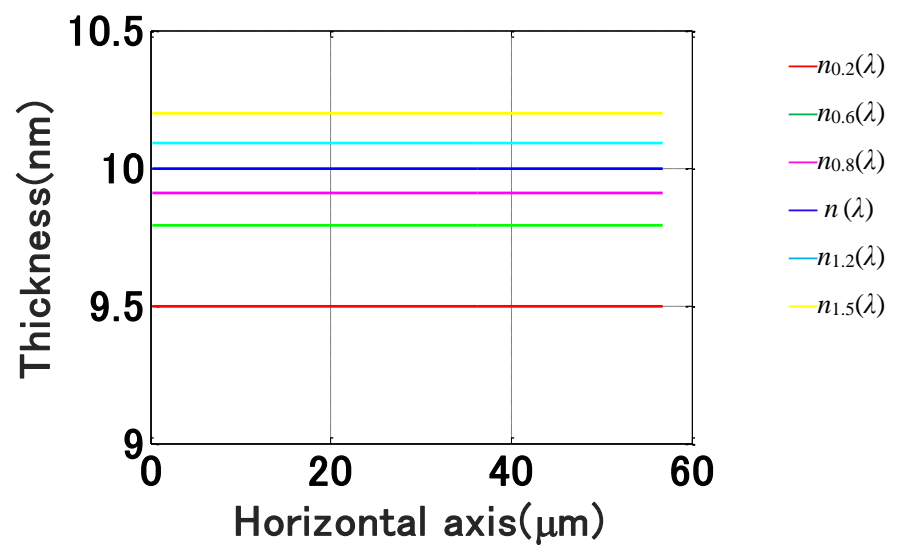
(a)  $n(\lambda_1)=2.15$



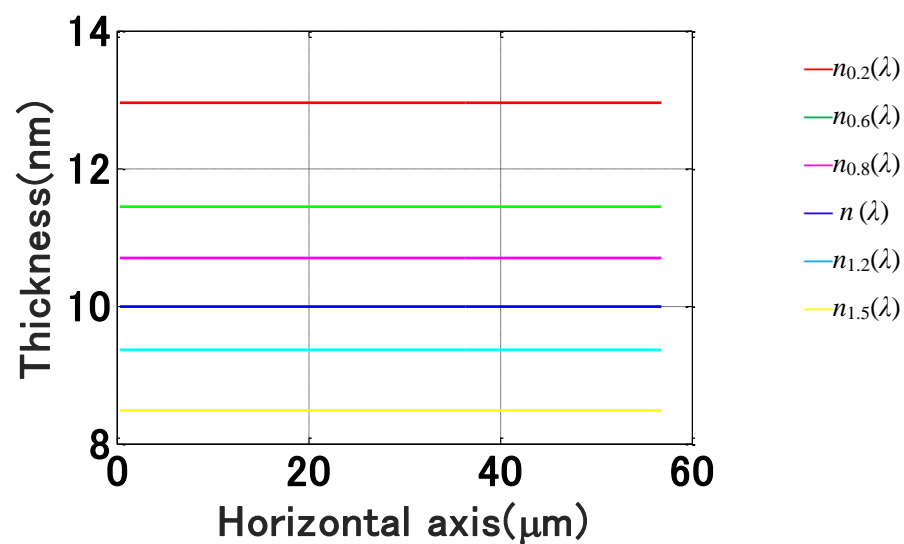
(b)  $n(\lambda_1)=1.90$

図.7.15 異なる屈折率分散

異なる屈折率分散によって、計測結果は、図.7.16 に示すように変化している。



(a)  $n(\lambda_1)=2.15$



(b)  $n(\lambda_1)=1.90$

図.7.16 異なる屈折率分散によって、計測結果

表 7.9 により、屈折率分散が異なると、理想値から離れる。理想値から離れたことは回転の交点と関係があることが分かった。

表 7.9 異なる屈折率分散によって、計測結果

屈折率分散	$n_{0.2}(\lambda)$	$n_{0.6}(\lambda)$	$n_{0.8}(\lambda)$	$n(\lambda)$	$n_{1.2}(\lambda)$	$n_{1.5}(\lambda)$
$n(\lambda_1)=2.15$	9.50	9.79	9.91	10.00	10.09	10.20
$n(\lambda_1)=1.90$	12.96	11.44	10.70	10.00	9.36	8.48

### 7.3.2 屈折率分散の最適化

ITO 透明膜は、合理的に  $\text{In}_2\text{O}_3$  と  $\text{SnO}_2$  の合金として表される。この材料は紫外線と近赤外線領域の両方において光吸収と共に非常に複雑な屈折率を有す。個々の製造業者の ITO 膜は僅かな反射率の違いから大きな反射率の違いもある。このような膜の光学的記述を更に複雑にするのは、ITO のよく知られる段階的な屈折率習性である。これは ITO 膜が 100nm を超える膜厚で蒸着する時に特に顕著に見られる。複雑な屈折率は、膜厚方向に移動すると変化することは極めてわかる。この場合、シンプルな（空間的に独立した）屈折率モデルは分光反射率データを十分に模倣できない。以上、実験での ITO 膜なサンプルの屈折率は 2.15 とした使用している。個々の製造業者の ITO 膜は、僅かな反射率の違いから大きな反射率の違いもある。図.7.17 は波長にしたがって、ジオマテックより提供いただいた ITO 膜の屈折率分散曲線である。

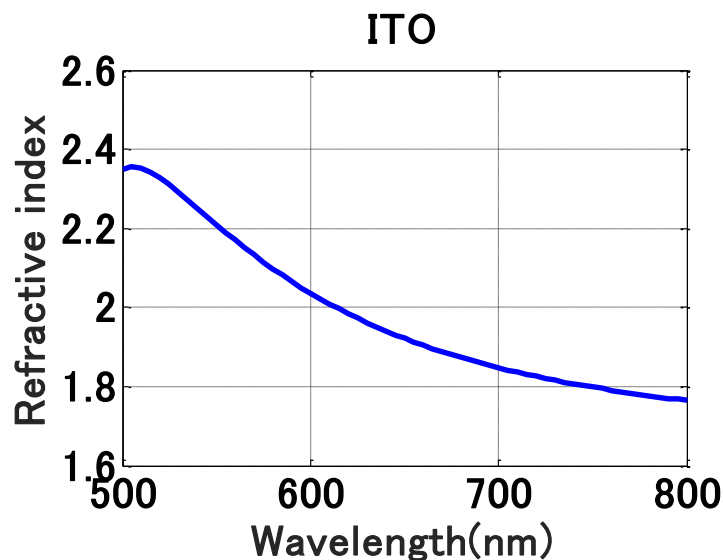
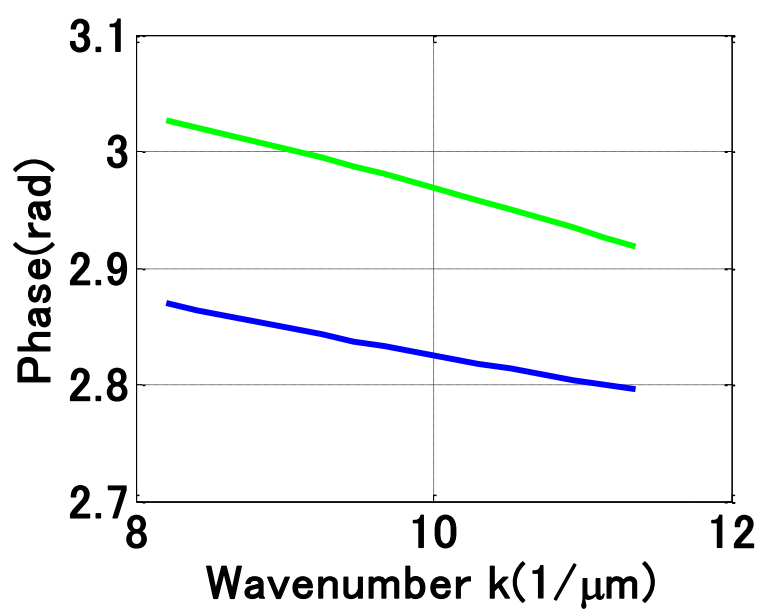


図.7.17 透明電極 ITO 膜の屈折率分散

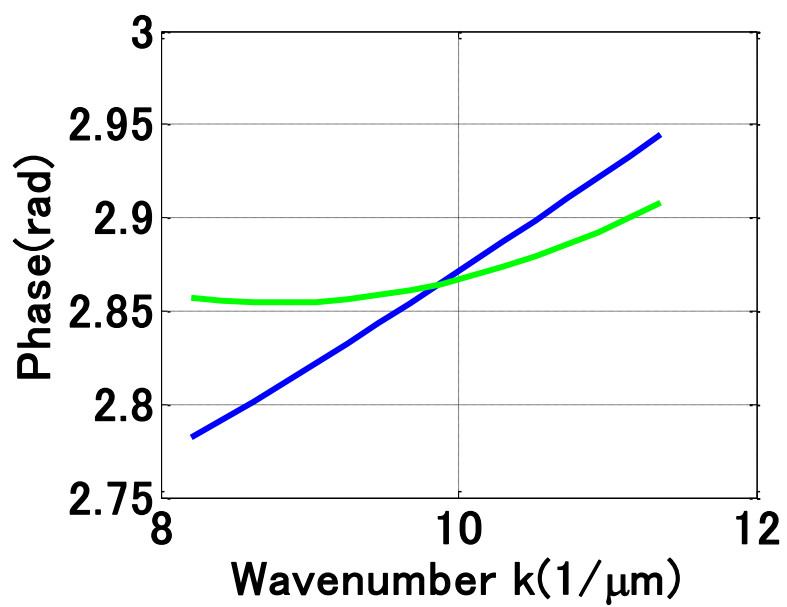
屈折率分散を考慮すると、実際の位相と更に近似している理論的なモデルをたてることが可能である。

計測誤差は小さくなった。そして、計測精度も高くなった。

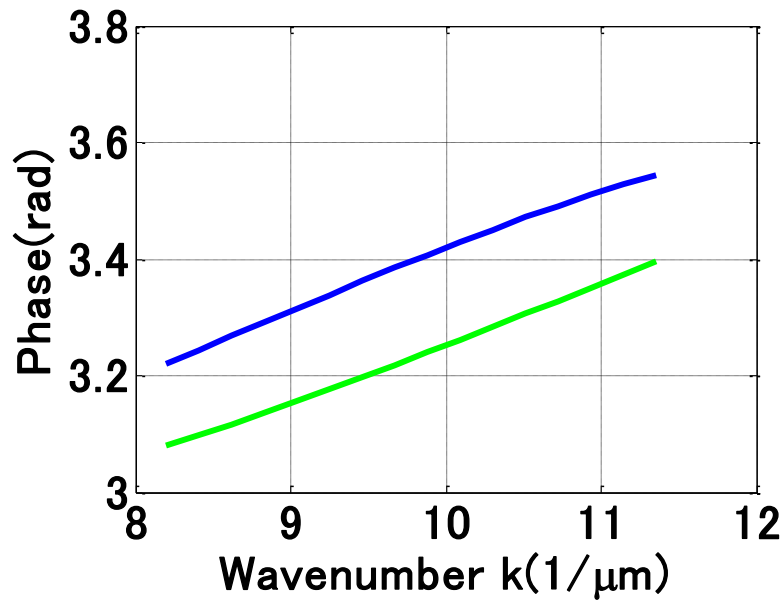
図.7.18 に示すように、屈折率分散を考慮する場合に、モデルをたてる位相情報を変化した。曲線類似性を判定する時に、対応する最適な膜厚の変動は小さくなった。



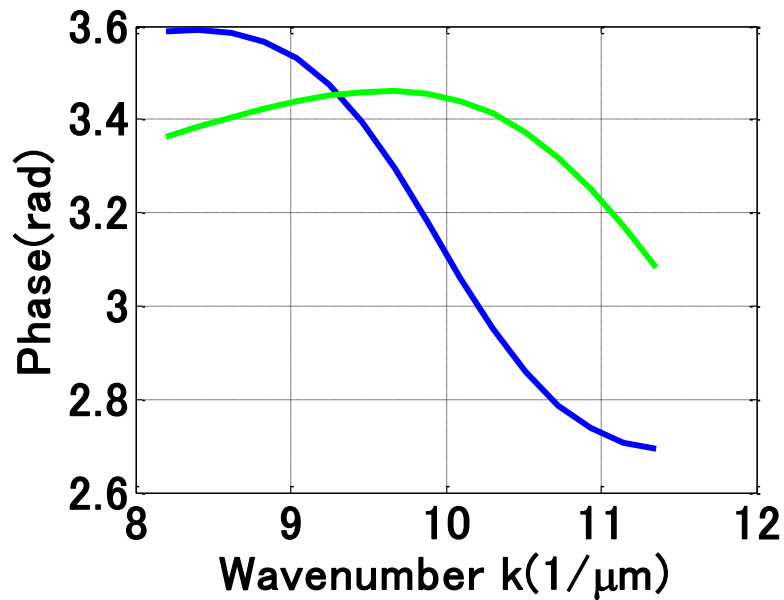
(a) 膜厚  $d=10\text{nm}$



(b) 膜厚  $d=50\text{nm}$



(c) 膜厚  $d = 100 \text{ nm}$



(d) 膜厚  $d = 150 \text{ nm}$

図.7.18 各膜厚のモデルをたてる位相情報の比較

(青線：屈折率分散を考慮しない位相情報、緑線：屈折率分散を考慮する位相情報)

図.7.19 に示すように、膜厚は  $8.5 \text{ nm}$  から  $14.0 \text{ nm}$  まで、両方のモデルをたてた。実際データ（離散データ）とモデルデータを一つずつ比較して、最適な膜厚を求める。屈折率分散を考慮しないと、計測した膜厚は比較的に分散している。屈折率分散を考慮すると、計測した膜厚は比較的に集中している。



膜厚 : 8.5nm~14.0nm

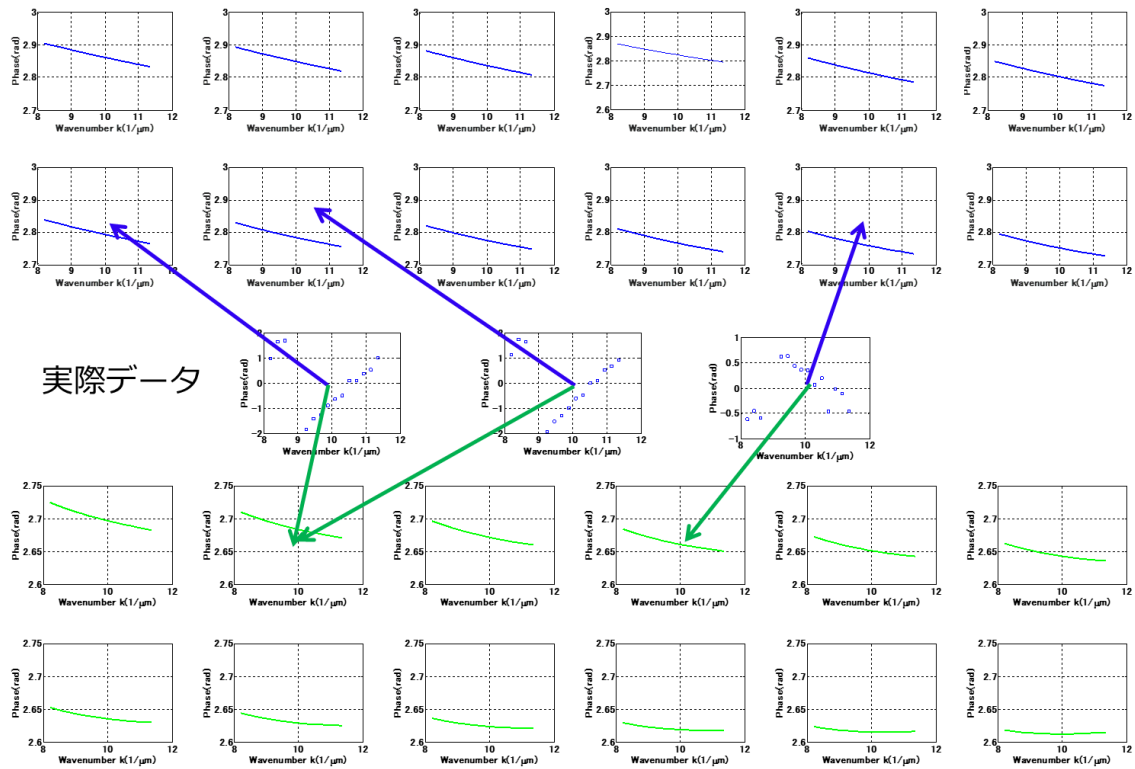


図.7.19 計測過程

屈折率分散を考慮する上で、改良した CM 法により、90nm と 9nm のサンプルの横軸断面図の計測結果は図.7.20 と図.7.21 である。

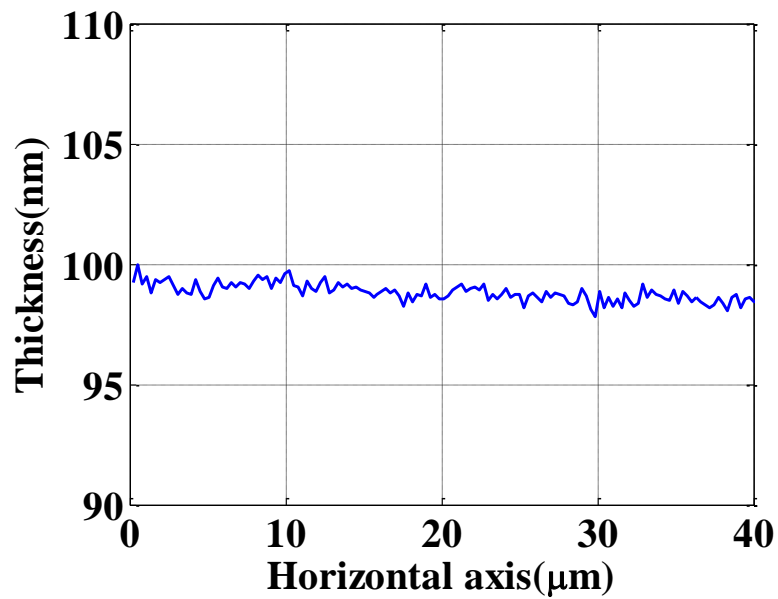


図.7.20 屈折率分散を考慮する 90nm の計測結果

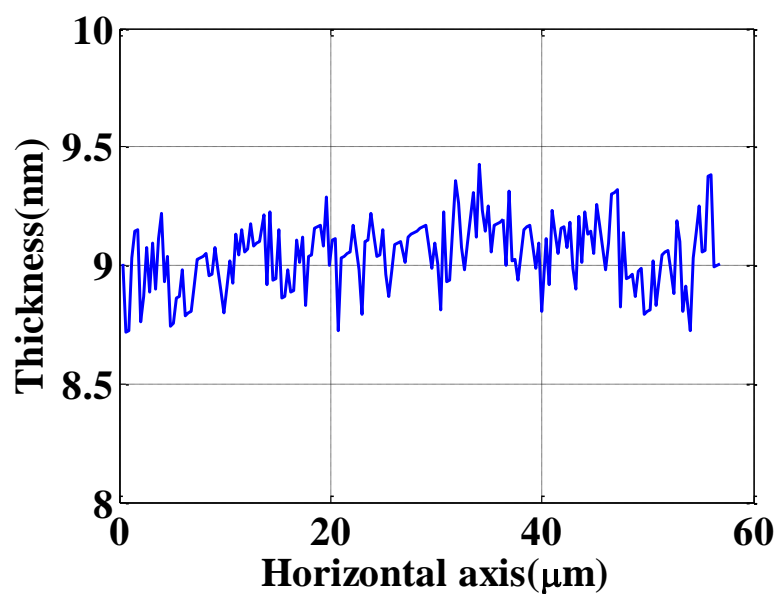


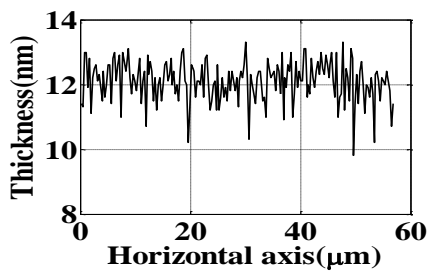
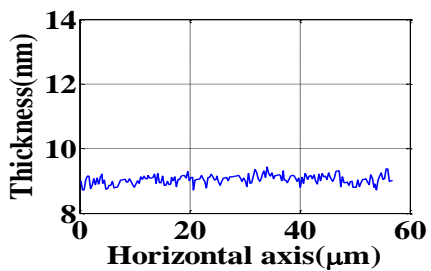
図.7.21 屈折率分散を考慮する 9nm の計測結果

表 7.10 と表 7.11 で、屈折率分散を考慮する後に、透明電極 ITO 膜の計測結果の比較である。

表 7.10 90nm のサンプルの計測結果の比較

	90nm のサンプル	
計測結果		
屈折率	2.15	$n(\lambda)$
最小値	93	97.2
最大値	103	99.9
平均値	98	98.8
分布範囲	10	2.7
標準偏差	1.887	0.4404

表 7.11 9nm のサンプルの計測結果の比較

	9nm のサンプル	
計測結果		
屈折率	2.15	$n(\lambda)$
最小値	9.8	8.7
最大値	13.3	9.4
平均値	12.1	9.0
分布範囲	3.5	0.7
標準偏差	0.6206	0.1429

上述により、モデルをたてる時に、簡略化すると計測結果の誤差を引き起こした。屈折率分散を考慮すると、さらに精確なモデルをたてることができ、実際データともっと近似した。計測結果の標準偏差は小さくなった。したがって計測結果を比べて、改良した CM 法で、膜厚の分布範囲は小さくなった。つまり、計測結果は安定になった。この場合の透明電極 ITO 膜厚の三次元分布は図.7.22 のように示される。

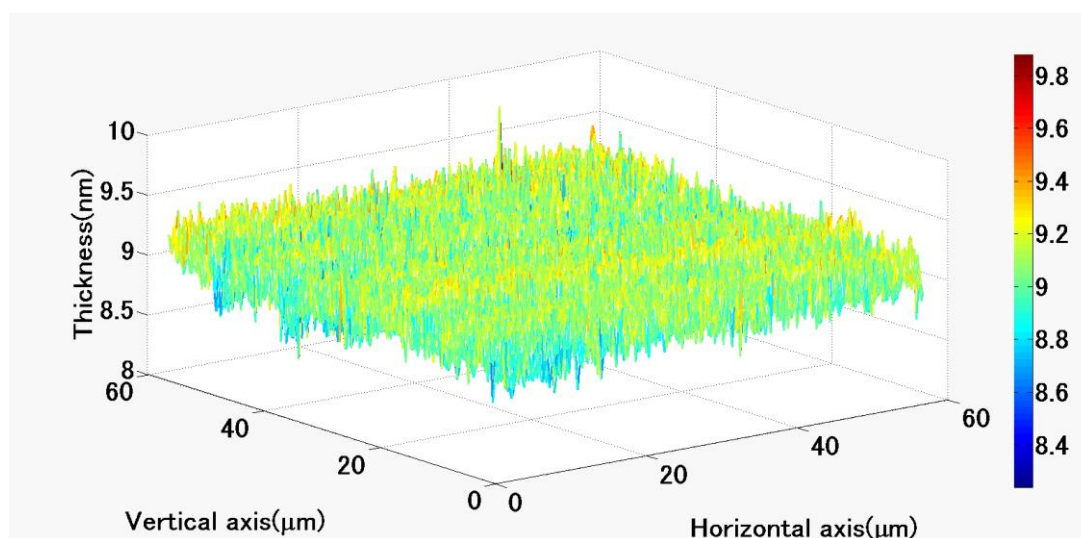


図.7.22 屈折率分散を考慮すると 9nm の透明電極 ITO 膜厚の三次元分布

### 7.3.3 開口数 NA の影響及び対策

本研究の干渉光学系は図.7.23 のような Mirau 干渉計を用いるため、実際の場合に、入射角はレンズの開口数 NA と関係がある。

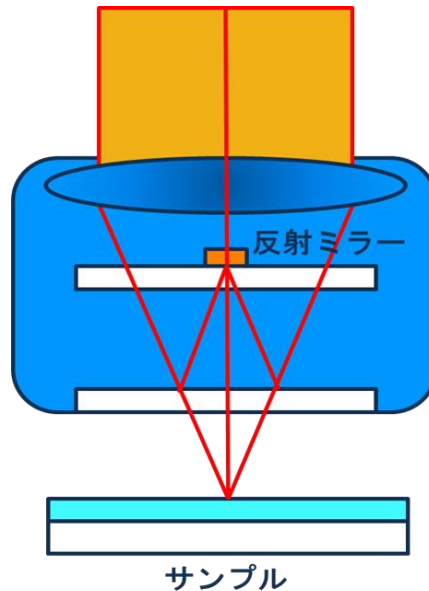


図.7.23 Mirau干渉計

レンズの開口数 NA はレンズの分解能を求めるための指数である。開口数 NA は物体から対物レンズに入射する光線の光軸に対する最大角度を $\theta_1$ 、物体と対物レンズの間の媒質の屈折率を $n$ （レンズの屈折率ではない）として、次の式で表される。

$$NA = n_1 \sin \theta_1 \quad (7.2)$$

本研究で、干渉計はニコン 50×の二光束干渉対物レンズの開口数 NA は 0.55 であるため、最大の入射角 $\theta_1$ は約  $33^\circ$  になった。これまでの研究は入射角が  $0^\circ$  であり、モデルを確立している。しかし、実際には、入射角が約  $0^\circ$  である場合に、Mirau 干渉計の内部で干渉することを発生できない。したがって、実際の状況に合う入射角の範囲は約 $-33^\circ$  から  $33^\circ$  までを考慮する。計測結果は精確になるために、表 7.12 のように、屈折率分散と入射角の範囲を考慮して、もう一度さらなる精確な理論モデルを確立する。

表 7.12 NA を考慮すると、モデルをたてる

	モデル 1	モデル 2
開口数 NA	0	0.55
入射角 $\theta_1/^\circ$	0	-33:33
波長 $\lambda/\text{nm}$	550:780	550:780
ITO 屈折率 $n_2$	$n(\lambda)$	$n(\lambda)$
膜厚 $D/\text{nm}$	1:100	1:100

上述の改良した極めて薄い透明電極ITO膜厚を計測するCM法を用いて、実験用サンプルの指示膜厚が9nmである透明電極ITO膜を計測する。図.7.24に示すように透明電極ITO膜の面上の観測点Aの膜厚を計測する。

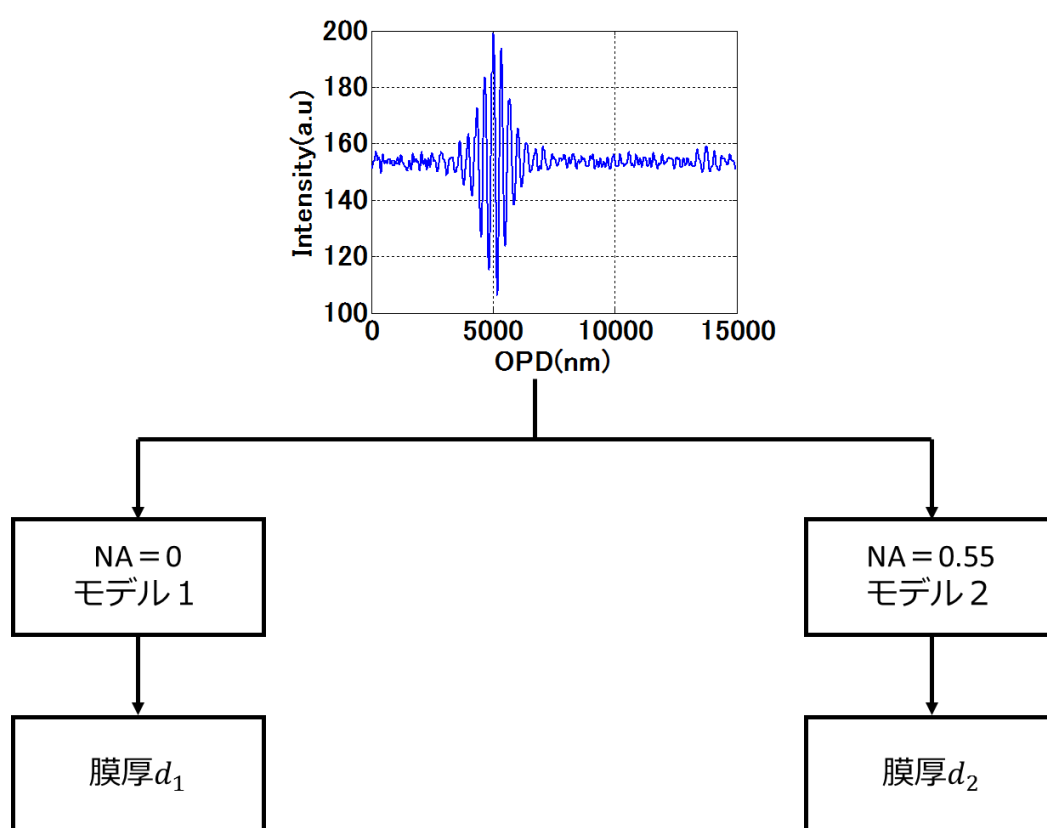
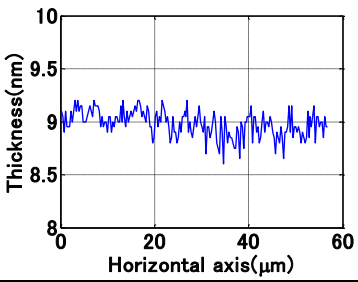
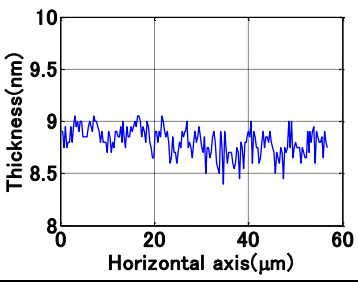


図.7.24 開口数 NA の考慮

開口数 NA を考慮すると計測結果は表 7.13 のように示す。

表 7.13 開口数 NA を考慮すると計測結果の比較

		
開口数 NA	0	0.55
最小値/nm	8.6	8.4
最大値/nm	9.2	9.1
平均値/nm	9.0	8.8
標準偏差	0.1224	0.1315

たてたモデルはもっと精確になって、実験データと近似している。

1. 開口数 NA を考慮すると、偏差が 2.2%である。
2. 開口数 NA を考慮すると、AFM での計測結果と更に近くなった。

上述の結論を確認するため、シミュレーションを行う。

シミュレーションの条件は膜厚が 9nm、波長が 550~780nm、実際の CCD 熱ノイズと屈折率分散を考慮することであり、開口数 NA を考慮するかどうかシミュレーションを行う。シミュレーションの結果は表 7.14 のように示される。

表 7.14 NA を考慮するとシミュレーション結果の比較

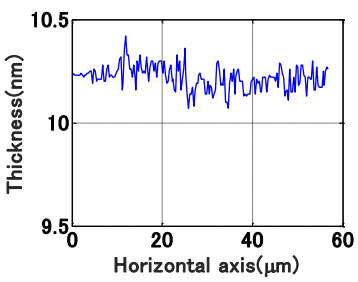
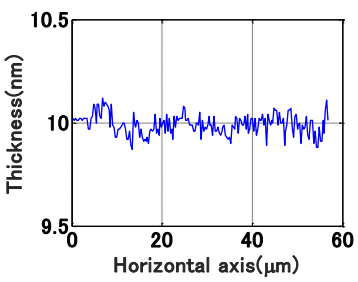
		
開口数 NA	0	0.55
最小値/nm	10.07	9.87
最大値/nm	10.42	10.12
平均値/nm	10.22	9.99
標準偏差	0.0576	0.0491

表 7.13 と表 7.14 を比較して、実験結果とシミュレーション結果は一致していると言える。

# 7.4 再現性の検証

再現性を検証するために、サンプルの同じ場所に膜厚を 10 回に計測する。  
 図.7.25 に示すように、同じ場所というのは、3×3pixel の平均値が求められた。

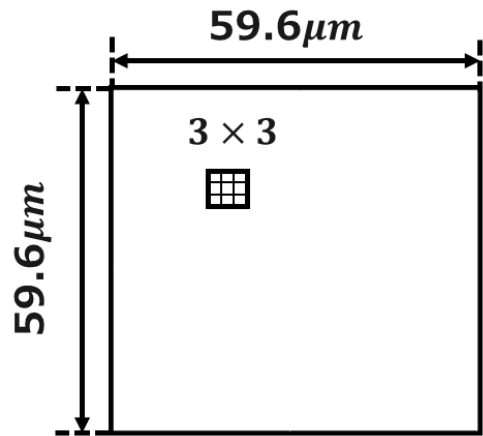


図.7.25 サンプル再現性の見取り図

改良した CM 法により、90nm と 9nm サンプルの再現性を計測結果は表 7.15 のように示す。この標準偏差により、計測結果は安定しているといえる。

表 7.15 90nm と 9nm サンプルの再現性

サンプル	90nm 計測結果 (nm)	9nm 計測結果 (nm)
1	99.2	9.0
2	99.1	8.7
3	98.6	8.7
4	98.8	9.2
5	98.9	9.1
6	99.1	9.3
7	98.6	8.7
8	99.1	8.8
9	98.9	9.0
10	98.7	8.8
標準偏差	0.2	0.2

## 7.5 計測結果のまとめ

本研究では 90nm、30nm と 9nm サンプルの計測を行った。従来のアルゴリズムは 50nm 以下の ITO 膜を解析できないために、従来の FDA アルゴリズムに基づいて、カーブマッチング法を開発した。90nm の ITO 膜を解析できるようにした。そして、カーブマッチング法をさらに改良して、9nm と 30nm の膜厚が計測できるようにした。

90nm と 30nm サンプルの横軸断面図の膜厚分布を計測する。図.7.26 と図.7.27 のように示す。

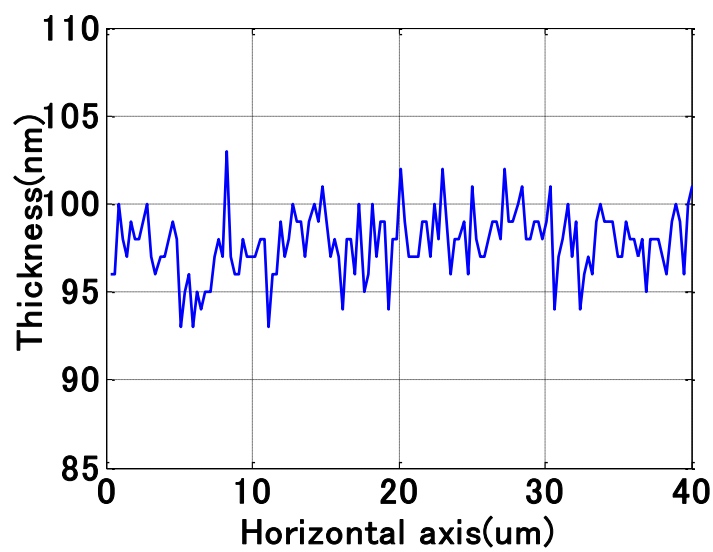


図.7.26 90nm サンプルの横軸断面図の膜厚分布

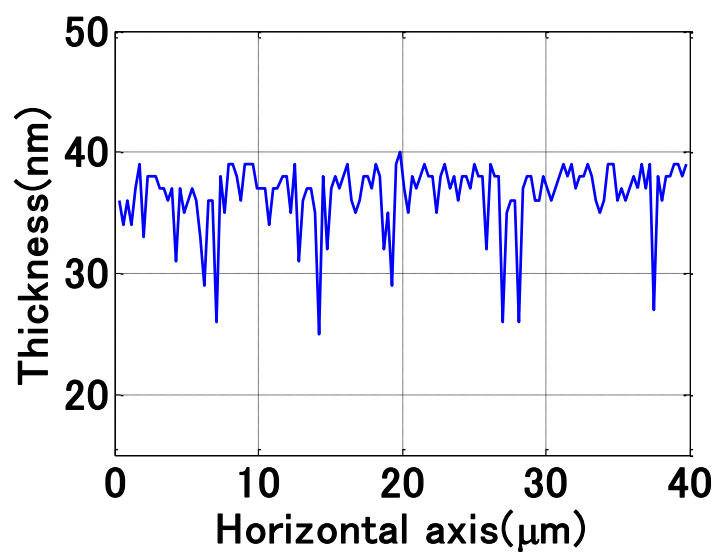


図.7.27 30nm サンプルの横軸断面図の膜厚分布



表 7.16 は、膜厚が異なる三つのサンプルについての計測結果を与える。計測結果により、計測値が指示値よりも約 10～30%で大きいことが示される。シミュレーション結果により、システムのノイズに影響する偏差は、システム構成に起因することを示した。そして、我々のシミュレーションもシステムのノイズがシミュレーションデータに重畳されて、計測の膜厚は大きくなったことを示した。

表 7.16 膜厚が異なる ITO 膜の計測結果

サンプル	指示値	計測値
No.1	90nm	98.8nm
No.2	30nm	36.5nm
No.3	9nm	8.8nm

屈折率分散と開口数 NA を考慮すると、計測結果は精確になった。

本研究は検討不足の点も挙げられる。

1. 時間不足のために、多くのサンプルを解析する結果が取得できない。
2. 従来の LM 法を使用する時に、50nm 以下の膜厚を計測できない他の原因がある可能性がある。
3. FDA アルゴリズムに基づいて、他の方法を開発する可能性が考えられる。
4. システム配置などの問題を考えていない。
5. 不安定データの除去の方法はフィルタを通じて実現することが可能である。

将来には、改善が望まれる点の一つである。

白色光干渉計測システムは、極めて薄い透明膜がリアルタイムモニタリングまたはフィルム均一性の計測に使用できるようになった。このアルゴリズムは被計測の透明膜の屈折率が既知である必要があり、大幅にこの方法の適用範囲を制限する。今後は異なる材料、異なる膜厚の透明電極 ITO 膜の計測を行う。

## 第八章

# 白色干渉計測の結論と展望

本文では、白色干渉計測を用いた透明電極 ITO 膜厚を計測することを目的として研究を行った。白色干渉計に基づいて、膜厚の計測原理に対して、説明と研究を討議した。

本文では、極わめて薄い透明電極 ITO 膜厚を計測するため、従来の FDA アルゴリズムに基づいて、新しいアルゴリズムを提案した。改良した CM 法は極めて薄い透明電極 ITO 膜厚（5nm から 50nm までの範囲を拡大する）が計測できるようにした。

改良した CM 法では、インターフェログラムをフーリエ変換してから、振幅情報と位相情報が得られた。この振幅情報により、ノイズの影響する部分を除去し、残った有効な位相情報により、透明電極 ITO 膜厚を求めた。

この総位相情報は光路差から引き起こす位相情報と膜内部の反射による位相情報の二つの部分を含んでいる。MatLab ソフトウェアで位相情報の線形フィッティングの方法を通じて、線形部分の光路差から引き起こす位相情報が求められる。総位相情報の中にこの線形位相情報を除いて、実際の透明電極 ITO 膜の曲線関係の膜内部の反射による位相変化を求めることが可能である。同様に MatLab ソフトウェアを利用して、透明電極の膜内部の異なる膜厚のために、一連の反射による位相情報のモデルをたてることができる。実際の位相情報は一連の理論的な位相モデルと一つずつ照合して、曲線類似性により、それぞれのデータの標準偏差を求めて、その中に最小値の対応する膜厚はサンプルの膜厚である。

そして、ノイズ、サンプルの屈折率分散、対物レンズの開口数 NA などの計測精度に影響を与えるパラメータを考慮して、計測結果の正確性と精確性が向上するようにした。

本文は 90nm、30nm と 9nm サンプルの計測を行った。計測結果により、計測値が指示値よりも約 10～30% 大きいことが示された。

今後の白色光干渉計測は、研究の課題として以下がある。

- 1、ITO 膜材料以外の透明膜を計測する。
- 2、多層膜を計測する。

## 参考文献

- 1) 根津禎, "透明電極に新材料を導入, 曲がる, 安い ITO を代替", 日経エレクトロニクス, 2009.8.10
- 2) Mingfu Zhang, Wenbin Xu, Haitao Shen, et.al., " New Research Progress of Transparent Conductive Oxide Films", PIEZOELECTRICS & ACOUSTOOPTICS, 2010, 32(5): 811-815
- 3) Ruojing Yin, "A membrane for ITO transparent conducting film" Changchun University of Science and Technology, 2006
- 4) Tadatsugu Minami, "Present status of transparent conducting oxide thin-film development for Indium-Tin-Oxide (ITO) substitutes", Thin Solid Films, 2008, 516(17): 5822-5828
- 5) Cheng Zhang, Dewei Zhao, Deen Gu, et.al., "An Ultrathin, Smooth, and Low-Loss Al-Doped Ag Film and Its Application as a Transparent Electrode in Organic Photovoltaics", ADVANCED MATERIALS, 2014, 26(32): 5696-5701
- 6) 情報機器と情報社会のしくみ素材集, (<http://www.sugilab.net/jk/joho-kiki/1603/>)
- 7) M Bendera, W Seeliga, C Daube, H Frankenberger, B Ocker, J Stollenwerk, "Dependence of film composition and thicknesses on optical and electrical properties of ITO-metal-ITO multilayers [J]", Thin Solid Films, 1998, 326:67-71
- 8) ITO Glass, ([http://www.xumatic.com/index.php?route=product/category&path=25\\_31,2016.3.25](http://www.xumatic.com/index.php?route=product/category&path=25_31,2016.3.25))
- 9) 分光/光干渉技術, (<http://www.hamamatsu.com/jp/ja/technology/innovation/spectroscopic/index.html>)
- 10) 分光反射率法による膜厚計測の原理, ([http://product.vitec.co.jp/product2.html?works\\_id=194](http://product.vitec.co.jp/product2.html?works_id=194))
- 11) 大塚電子株式会社, "分光法による膜厚解析", (<http://www.photal.co.jp>)
- 12) TORAY, "光干渉法による透明膜の計測" SP-500/700 技術資料, No.4
- 13) 白藤立, "エリプソメトリ法", 名古屋大学大学院工学研究科マテリアル理工学専攻
- 14) 王子計測機器株式会社, "偏光計測に関連するキーワードの説明", Oji Scientific Instruments, 2010.01
- 15) 吉田貞史, "エリプソメトリ観察でわかる界面", 産業技術総合研究所
- 16) 谷田貝豊彦, "光とフーリエ変換", 朝倉書店, 1992
- 17) 小林俊洋, "白色干渉による液晶フォトスペーサ表面形状の計測", 筑波大学修士学位論文, 2005
- 18) 北川克一, "光干渉法による三次元計測", 計測と制御, 2011.50(2):97-104
- 19) Yuansheng Luo, Songlin Chen, Ping Ma, et.al., "Influence of Thickness on Electrical and Optical Property of ITO Thin Films", PIEZOELECTRICS & ACOUSTOOPTICS, 2010, 32(6):1024-1026 (in Chinese)
- 20) Dongfeng Geng, Yingjie He, Hongyi Su, "Study on the measurement of transparent step by white-light interferometer", OPTICAL INSTRUMENTS, 2013, 35(6): 74-77. (in Chinese)

- 21) 佐藤彰吾, 中野武雄, 馬場 茂, "X 線光電子分光法の深さ方向分析から分かる Si 基板上 In 島状膜の構造およびその膜厚変化", 真空, 2005,48(3):121-123.
- 22) Masahide Itoh, Ryuji Yamada, Ronglong Tian, et.al., "Broad-Band Light-Wave Correlation Topography Using Wavelet Transform", OPTICAL REVIEW, 1995, 2(2):135-138
- 23) Long Ma, Tong Guo, Fang Yuan, "Thick film geometric parameters measurement by white light interferometry", International Conference on Optical Instruments and Technology, 2009, (7507): 750701-750709
- 24) 佐藤敦, "白色干渉法を利用した最新の表面形状評価技術", 表面技術, 2006.57(8):554-558
- 25) James C. Wyant, "White Light Interferometry", Proceedings of SPIE, 2002.4737:98-107
- 26) 荒井正敏, "表面形状計測技術-概要と触針式計測法", 表面技術, 2006.57(8):548-553
- 27) Paul J. Caber, "Interferometric profiler for rough surfaces", Applied Optics, 1993.32(19):3438-3441
- 28) 三宅正二郎, 石井正紀, 大竹利明, 津嶋尚武, "原子間力顕微鏡によるマイカのナノメートルスケールの機械加工", 精密工学会誌, 1997.63(3):426-430
- 29) 三宅正二郎, 大竹利明, 浅野正志, "原子間力顕微鏡によるマイカの 1nm 深さの標準スケールの形成", 精密工学会誌, 1999.65(4):570-574
- 30) 黄佩森, 清野慧, 鎌田治, "追従式光触針法に関する研究ゼロ位法の効果", 1989 年度精密工学会春季大会学術講演会
- 31) 井関敏之, 吉川浩史, 高橋実, "レーザー走査光学素子の形状計測・評価技術", Ricoh Technical Report, 1997.9
- 32) 渡邊俊哉, "走査型電子顕微鏡", Jpn. Soc. Colour Mater., 2006.79(3):120-125
- 33) 菊川真, 城野政弘, 安井一雄, 安達正晴, 稲田裕, "走査電子顕微鏡による疲労損傷についてのミクロな定量的計測", 材料, 1974.23(252):708-715
- 34) 市ノ川竹男, "走査型トンネル顕微鏡とその関連技術", 電子顕微鏡, 1991.26(1):16-30
- 35) 小林賢知, 樋口俊郎, 青木勇, 工藤謙一, "三次元内部構造顕微鏡の開発", 精密工学会誌, 1995.61(1):100-106
- 36) 石原満宏, 佐々木博美, "非走査マルチビーム共焦点撮像系による高速三次元計測", 精密工学会誌, 1998.64(7):1022-1028
- 37) 小川英光, 中野渡祥裕, "位相シフト法による透明膜に覆われた物体の 3 次元形状計測", 東レエンジニアリング, 2004 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集
- 38) 佐佐木芳彰, 須賀真之, 春日博, 湯浅哲也, 大森整, 大谷知行 "位相シフト干渉法を用いたテラヘルツ 3 次元イメージング", 電子情報通信学会, 2011.12
- 39) Kieran G. Larkin, "Efficient nonlinear algorithm for envelope detection in white light interferometry", J. Opt. Soc. Am. A, 1996.13(4):832-843
- 40) Kieran G. Larkin, Donald J. Bone, and Michael A. Oldfield, "Natural demodulation of two-dimensional fringe patterns. I. General background of the spiral phase quadrature transform J ", Optical Society of America, 2001.18(8):1862-1870
- 41) Kenichi Hibino, Bob F. Oreb, David I. Farrant, and Kieran G. Larkin, "Phase-shifting algorithms for nonlinear and spatially nonuniform phase shifts", Optical Society of America, 1997.14(4):918-930

- 42) Atsushi Momose, Wataru Yashiro, "Phase Tomography by X-ray Talbot Interferometry for Biological Imaging", Journal of Applied Physics, 2006.45(6A):5254-5262
- 43) Max Born, Emil Wolf, "Principles of Optics : Electromagnetic Theory of Propagation, Interference and Diffraction of Light ", Cambridge University Press, 1999
- 44) 北川克一, "白色干渉法による高速表面形状計測装置", 光技術コンタクト, 2004.42(11)
- 45) P.de Groot, "What is Frequency Domain Analysis", R&D Technical Bulletin, 1993.9.23
- 46) Peter de Groot, Xavier Colonna de Lega, Jim Kramer, Michael Turzhitsky, "Determination of fringe order in white-light interference microscopy", APPLIED OPTICS, 2002.41(22):4571-4578
- 47) Peter de Groot, Leslie Deck, "Surface profiling by analysis of white-light interferograms in the spatial frequency domain", Proc. SPIE, 1994.2248:101-104
- 48) Kai Chen, Feng Lei, Masahide Itoh, "Measurement of ITO transparent electrode with white-light interferometer", Chinese Optics (Chinese phonetic alphabet: ZhongGuo GuangXue), 2015.8(4): 567-573.
- 49) 小川英光, 下山賢一, 福永正和, 北川克一, 杉山将, "白色光干渉法による透明膜に覆われた物体の膜厚と表面形状の同時計測", 計測自動制御学会論文集, 2007.43(2):71-77
- 50) S. Chen, A. W. Palmer, K. T. V. Grattan, and, B, T, Meggitt, "Digital signal-processing techniques for electronically scanned optical-fiber white-light interferometry", APPLIED OPTICS, 1992, 31(28): 6003-6010
- 51) 北川克一, "表面形状計測装置 SP-500 とその応用-光干渉法で世界最高速の計測速度を実現", 日本工業出版光アライアンス, 2002.13(7)
- 52) 平林晃, 小川英光, "帯域通貨型標本化定理を用いた白色光干渉による表面凹凸形状の高速計測", 計測自動制御学会論文集, 2000.36(1):16-25
- 53) 市野芳明, 宮川洋, "帯域制限波形に対するヒルベルト変換及び離散的ヒルベルト変換", 電波研究所季報, 1981.27(144): 373-386
- 54) 章忠, 中堀智之, 川畑洋昭, "高速ウェーブレット変換およびその脳波解析への応用", 日本機械学会論文集 (C 編) , 1999.65(633): 1915-1921
- 55) Kai Chen, Feng Lei, Masahide Itoh, "Efficient phase matching algorithm for measurements of ultrathin indium tin oxide film thickness in white light interferometry", Optical Review, 2017.24(2):121-127
- 56) 永田信一, "図解レンズがわかる本", 日本実業出版社, 2002
- 57) 吉田正太郎, "光学機器大全", 誠文堂新光社, 2000
- 58) MORITEX Corporation, "ハロゲン光源 Megalight@100"  
(<https://www.moritex.co.jp/products/mvs/megalight100.php>)
- 59) Basler, "scA640-70gm - Basler scout", (<https://www.baslerweb.com/jp/products/cameras/area-scan-cameras/scout/sca640-70gm/>)
- 60) 陳凱, "白色干渉計測を用いた透明電極 ITO の計測", 筑波大学修士学位論文, 2013
- 61) Physik Instrumente, "工業規模で要求される速度で試験", (<https://www.pi-japan.jp/ja/applications/microscopy/high-speed-microscopy/>)
- 62) 吉岡伸也, "薄膜干渉を繰り返し用いて多層膜反射スペクトルを計算する方法", 大阪大学生命機能
- 63) Seung-Woo Kim, Gee-Hong Kim, "Thickness profile measurement of transparent thin-film layers by white-

light scanning interferometry", APPLIED OPTICS, 1999, 38(28):5968-5973

- 64) Maitreyee Roy, Ian Cooper, Peter Moore, Colin J. R. Sheppard, Parameswaran Hariharan, "White-light interference microscopy effects of multiple reflections within a surface film" OPTICS EXPRESS, 2005, 13(1):164-170
- 65) A.V.Tikhonravov, P.W.Baumeister, K.V.Popov, "Phase properties of multilayers" APPLIED OPTICS, 1997, 36(19):4382-4392
- 66) Hui Xue, Weidong Shen, Peifu Gu, et.al., "Thickness Measurement of Thin Film Based on White-Light Spectral Interferometry", Acta Optica Sinica, 2009, 29(7):1877-1880
- 67) S. Chen, A. W. Palmer, K. T. V. Grattan, and, B. T. Meggitt, "Digital signal-processing techniques for electronically scanned optical-fiber white-light interferometry", APPLIED OPTICS, 1992, 31(28): 6003-6010
- 68) Haitao Xu, Xiaojun Liu, Wenlong Lu, et.al., "Efficient signal modeling for vertical scanning white light interference microscopy", Optical Technique, 2013, 39(3): 195-199
- 69) 電気情報工学科コンピュータシミュレーション, "非線形方程式の数値計算", 秋田工業高等専門学校
- 70) 穴井宏和, "数理最適化の実践ガイド", 講談社, 2013
- 71) Henri P. Gavin, "The levenberg Marquardt method for nonlinear least squares curve fitting problems", Duke University, 2017
- 72) Alon Efrat, Quanfu Fan, "Curve Matching Time Warping and Light Fields New Algorithms for Computing Similarity between Curves", Department of Computer Science, University of Arizona, 2007
- 73) Yongxiang Xu, Qianfang Zhang, Songsong Liu, "3D Micro Topography Measurement Based on Spatial Frequency Domain Algorithm", Opto-Electronic Engineering, 2014, 41(8): 16-21

# 謝辞

本研究を進めるにあたって多くの方のご指導、ご助言を賜ったことを深く感謝致します。

雷楓氏におかれましては、六年間共に実験を進めていくなかで、親身になって研究を指導していただき、また、様々な専門的な助言をしていただきました。この研究分野では初心者だった私がなんとか進んでいくことができたのも、深く感謝いたします。

伊藤雅英教授、青木貞雄先生、渡辺紀生先生におかれましては、長い間、研究だけでなくあらゆる面で熱心にご指導いただきました。また、実験を進めていく上で多くの専門知識を教えてくださいました。私的な都合により、多大な迷惑をおかけしてしまいましたが、それでもいつもはげまして頂きました。心から感謝いたします。ありがとうございました。

星野鉄哉氏におかれましては、研究者としての心構えを一から指導して下さいました。また、研究に行き詰った時に親身に相談にのっていただきました。深く感謝いたします。ありがとうございました。

張龔氏、笠木隆裕氏、趙印超氏、李恩氏におかれましては、同期の研究者として、また仲間として支えていただきました。非常に心強かったです。感謝しております。ありがとうございました。

その他、研究室の張楠氏、李維率氏、友達劉魏琦氏、郭陸氏には、様々なことでお世話になりました。本当にありがとうございました。

最後になりましたが、迷走を続けていた私を導き、精神的、経済的にも支えていただき、再び研究をする機会を与えていただいた、父と母に深くお礼申し上げます。

本当にありがとうございました。